

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

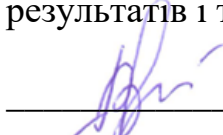
Новіков Валерій Іванович

УДК 621.396.1

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ
БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ
ВИКОРИСТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ
05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 В.І. Новіков

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Лисенко Олександр Іванович, д. т. н., професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Новіков В.І. Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача - розробка методу підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) на основі використання телекомунікаційних аероплатформ (ТАП) в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних сенсорних вузлів (МСВ).

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульована мета і завдання дослідження, описані методи дослідження, показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано особистий внесок здобувача та приведені відомості про апробацію результатів дисертації, структуру дисертації та її обсяг.

У **першому розділі** проведено аналіз функціонування МБСМ на основі використання ТАП, показано, що вони відносяться до класу динамічних, складних, багатофункціональних та багаторівневих систем, які мають при розробці проблеми, пов'язані з побудовою та підтримкою структури заданої зв'язності, якістю обслуговування МСВ, підвищенням пропускної здатності мережі. Функціонування таких складних мереж потребує ефективної системи управління, частиною якої є підсистема управління топологією (місцеположенням) мережею ТАП.

Проведено аналіз існуючих методів підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП та показано, що існуючі на сьогодні методи, які закладаються в систему управління топологією

(місцеположенням) ТАП, вирішують лише часткові задачі, що забезпечують геометричну зв'язність роз'єднаних компонентів МБСМ, не враховують обмеження на ємність каналних ресурсів, розподіл навантаження та обслуговування пакетів в вузлах МБСМ. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, та не враховують характер мобільності МСВ та маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню.

Існуючи методи планування наземних безпроводових сенсорних мереж (БСМ) також не ефективні, оскільки вони мають велику складність і час обчислення, що заважає ТАП відпрацьовувати в режимі реального часу отримані рішення. Тому розробка методу підвищення пропускну здатності МБСМ на основі використання ТАП в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ є актуальною і має як теоретичне, так и прикладне практичне значення для забезпечення ефективного функціонування сучасних МБСМ.

Другий розділ присвячено удосконаленню математичної моделі оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП полягає в поєднанні аналітичної моделі оцінки достовірності передачі даних в радіоканалах МБСМ із ТАП з аналітичними моделями переміщення МСВ.

Показано, що максимальна дальність радіозв'язку пари МСВ обмежується, енергетикою радіоканалу, при якій відношення сигнал-шум в точці прийому не менше заданої величини для забезпечення визначеної ймовірності пакетної помилки при заданому виді сигнально-кодової конструкції (СКК), та визначається ефективністю протоколу множинного доступу (МД) до спільного каналу передачі.

Показано, що якщо відома максимальна похила дальність радіолінії МСВ-ТАП та допустимий кут місця для точці розміщення МСВ, то можна визначити максимальний радіус стільника, що створюється ТАП. Так при куті місця від 60^0 до 90^0 у межах міста зі щільною забудовою він становитиме $R \leq 1500$ м при висоті ТАП $2600 \leq h < 3000$ м. Але враховуючи маневрування

ТАП по колу з мінімальним радіусом та неточність його виводу в точку розміщення, радіус зони стабільного радіопокриття становитиме $R^o \leq 1450$ м.

На основі простих моделей досліджено тривалість зв'язності МСВ МБСМ із ТАП у випадку прямої радіо видимості та з використанням ретрансляції. Показано, що тривалість зв'язності МСВ прямо пропорційна розміру зони радіо покриття та обернено пропорційна швидкості переміщення МСВ. На тривалість зв'язності також впливає сценарій мобільності МСВ. Моделювання переміщення МСВ було виконано за 4-ма сценаріями: «марш», «випадкові напрямки», «випадкове блукання в полі» і «випадкове блукання в місті». Найбільша тривалість зв'язності постерігається в третьому сценарії, а найменша – в другому (при фіксованому радіусі зони радіо покриття та швидкості переміщення МСВ). Середня тривалість зв'язності з'єднання ТАП-МСВ (пішохід) у випадку «випадкових напрямків» має значення до 36 хвилин, а з'єднання ТАП-МСВ (транспортний засіб) до 5 хвилин. Отримані результати використовується далі в методі підвищення пропускної здатності на основі управління положенням ТАП, що розглядається в Розділі 4.

В третьому розділі досліджуються аналітичні моделі розрахунку трафіку в МБСМ із ТАП, аналітичні моделі оцінки пропускної здатності МБСМ із ТАП та середньої затримки передачі в маршрутах МБСМ із ТАП. Запропоновано прості математичні моделі для розрахунку інтенсивності трафіку, що передається каналами МБСМ із ТАП, з урахуванням особливостей функціонування мережі (частотного розподілу, МД), що дозволяють розраховувати пропускну здатність МБСМ із ТАП.

Показано, що пропускна здатність маршруту передачі даних в МБСМ із ТАП визначається мінімальним значенням пропускною здатності каналу, що входить до його складу. При цьому канали МСВ-ТАП-МСВ мають більшу пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковій інтенсивності трафіку у діапазоні до 24 пак./Т, що визначається мінімально можливим рівнем пропускною здатності ($s^0 = 0,5$). У такому випадку для підвищення

пропускної здатності МБСМ доцільніше передавати дані через мережу ТАП при умові, що затримка передачі пакетів в маршруті не перевищує задану.

Якщо необхідно передати повідомлення на більшу відстань, аніж дальність прямого з'єднання, тоді необхідно застосовувати механізм ретрансляції пакетів через проміжні мережеві вузли. Максимальна дальність зв'язку при цьому визначається заданим значенням величини затримки передачі повідомлень «із кінця в кінець» для забезпечення необхідної якості обслуговування. Для застосувань реального часу невисокої інтерактивності (дані, голос) максимальна кількість ретрансляцій при передачі повідомлень через мережу МСВ при ($t_3^0 = 400\text{мс}$) повинна бути не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій доцільніше передавати пакети через мережу ТАП. При цьому всередині стільника пакети вигідніше ретранслювати при кількості ланок зв'язку більше ніж 3, а через мережу ТАП – більше ніж 4. Це можна використати для пошуку оптимального маршруту між заданою парою відправник-одержувач.

У **четвертому розділі** розроблено метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП. Суть розробленого методу полягає в систематизації та поєднанні в єдину обчислювальну процедуру математичних моделей оцінки структурної зв'язності МБСМ на основі використання ТАП, показників якості обслуговування МСВ, а також удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, для досягнення значень пропускної здатності МБСМ із ТАП в режимі реального часу близьких до екстремальних.

Показано, що задача пошуку матриці зв'язності C_k (оптимального розміщення ТАП) відноситься до класу NP -повних. Використання класичних методів для її рішення приводить до експонентної складності. Точне рішення для МБСМ із ТАП з сотнями (тисячами) МСВ, вимагає значних затрат часу. Для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП запропоновано використовувати сукупність правил, що поєднані в базу знань, які змінюють зв'язність мережі МБСМ із ТАП для підвищення пропускної здатності

МБСМ із ТАП та скорочують час обчислень. Це сприяє отриманню в реальному часі близьких до оптимальних (квазіоптимальні) рішення і використанню запропонованого алгоритму для оперативного управління положенням ТАП.

Оцінка ефективності запропонованого методу показує, що його вииграш (відносно базової стратегії) становить в середньому 10-12%. Середнє відхилення значень пропускної здатності МБСМ із ТАП відносно методу повного перебору при цьому становить 5-7%. Середнє значення часу отримання рішення для розробленого методу становить 24 с, що при середній тривалості зв'язності між МСВ до 350 с, дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу.

Головні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

- Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Суть удосконалення моделі полягає в поєднанні сукупності аналітичних моделей оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах із сукупністю запропонованих аналітичних моделей прогнозування переміщення МСВ. Показано, що максимальна дальність зв'язності МСВ при заданих вимогах до протоколу МД становить до 600м для каналу МСВ-МСВ та до 3000м для каналу МСВ-ТАП. На основі розроблених математичних моделей переміщення МСВ було досліджено тривалість безпосередньої зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Так тривалість з'єднання ТАП – МСВ-пішохід становитиме у найгіршому випадку в середньому 36 хвилин, а з'єднання ТАП – МСВ-транспортний засіб - 5 хвилин, що дозволяє на практиці прогнозувати час перебування МСВ в зоні радіо покриття ТАП та визначати частоту зміни положення ТАП у просторі.

- Досліджено математичні моделі оцінки функціональних показників МБСМ із ТАП, що базуються на розрахунку трафіку в мережі і вточнених аналітичних співвідношеннях оцінки пропускної здатності і середньої затримки передачі. Показано, що радіоканали зв'язку із ТАП за рахунок

дулексної організації зв'язку мають більшу на 15% пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковому навантаженні.

- Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП. Суть удосконалення алгоритму полягає в тому, що при пошуку квазіоптимального положення ТАП вдалося уникнути повного перебору варіантів їх розміщення завдяки застосуванню попередньо розроблених правил відбору варіантів такої зміни зв'язності МБСМ із ТАП, що підвищують пропускну здатність МБСМ із ТАП, а також зменшують час обчислень. При цьому середнє значення часу отримання рішення становить 24с, що при середній тривалості зв'язності між МСВ до 350с дозволяє в режимі реального часу виконувати управління положенням ТАП. Відхилення квазіоптимальних рішень від оптимальних, які отримані методом повного перебору, не перевищує 5-7%.

- Вперше розроблено метод підвищення пропускну здатності МБСМ на основі використання ТАП. Відмінність розробленого методу від відомих методів полягає в тому, що математичні моделі оцінки зв'язності і якості обслуговування МСВ, а також удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП вперше були об'єднані в єдину обчислювальну процедуру. Це дозволяє в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ досягати значень пропускну здатності МБСМ, близьких до екстремальних. Виграш запропонованого методу відносно базової стратегії управління положенням ТАП становить в середньому 10-12%.

Наукові результати, отримані в дисертації, можуть бути використані при розробці сучасних систем управління МБСМ із застосуванням ТАП та підвищенні ефективності їх функціонування.

Ключові слова: пропускну здатність, зв'язність, мобільна безпроводова сенсорна мережа, телекомунікаційна аероплатформа, мобільний сенсорний вузол, управління, місцеположення.

ABSTRACT

Novikov V.I. Method of increasing the bandwidth of mobile wireless sensor networks based on the use of telecommunication air platforms. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for a candidate degree of technical sciences on a specialty 05.12.02 - telecommunication systems and networks. - National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky» MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation solves an important scientific and technical problem - the development of a method of increasing the bandwidth of mobile wireless sensor networks (MWSN) based on the use of telecommunication air platforms (TAP) in conditions of rapid and unpredictable movement of mobile sensor nodes (MSN).

The introduction substantiates the choice of research topic, formulates the purpose and objectives of the study, describes the research methods, shows the scientific novelty and practical significance of the results, the relationship with scientific programs, plans, topics, describes the personal contribution of the applicant and provides information on testing the results of the dissertation. the structure of the dissertation and its scope.

The first section analyzes the operation of MWSN based on the use of TAP, shows that they belong to the class of dynamic, complex, multifunctional and multilevel systems that have problems in developing and maintaining the structure of a given connectivity, quality of service MSN, increasing network bandwidth. The operation of such complex networks requires an effective control system, part of which is the subsystem control topology (location) of the TAP network.

The analysis of existing methods of increasing the bandwidth of MWSN based on the use of TAP shows that the current methods, which are embedded in the topology (location) control system of TAP, solve only partial problems that ensure geometric connectivity of disconnected components of MWSN, not take into account the limitations on the capacity of channel resources, load balancing

and packet service in MWSN nodes. Also, most methods solve only static problems, and do not take into account the nature of the mobility of the MSN and the maneuverability of the TAP, and therefore are subject to improvement.

Existing methods of planning terrestrial wireless sensor networks (WSN) are also not effective, as they have a high complexity and computation time, which prevents TAP to work out real-time solutions. Therefore, the development of a method of increasing the capacity of MWSN based on the use of TAP in conditions of rapid and unpredictable movement of MSN is relevant and has both theoretical and applied practical significance to ensure the effective operation of modern MWSN.

The second section is devoted to improving the mathematical model for estimating the connectivity of MWSN nodes with TAP. The essence of improving the model for assessing the connectivity of MWSN nodes with TAP is to combine the analytical model for assessing the reliability of data transmission in MWSN radio channels with TAP with analytical models of MSN movement.

It is shown that the maximum radio communication range of the MSN pair is limited by the energy of the radio channel, at which the signal-to-noise ratio at the receiving point is not less than a given value to ensure a certain probability of packet error for a given type of signal code structure, access (MA) to the common transmission channel.

It is shown that if the maximum inclined range of the MSN-TAP radio line and the allowable angle of location for the MSN location point are known, then the maximum radius of the cell created by the TAP can be determined. Thus, at an angle of 60° to 90° within a densely populated city, it will be $R \leq 1500$ m at the height of the TAP $2600 \leq h < 3000$ m. But taking into account the maneuvering of the TAP in a circle with a minimum radius and the inaccuracy of its output to the point of placement, the radius of the zone of stable radio coverage will be $R^o \leq 1450$ m.

Based on simple models, the duration of connectivity of MSN MWSN with TAP in the case of direct radio visibility and using retransmission was investigated.

It is shown that the duration of connectivity of the MSN is directly proportional to the size of the radio coverage area and inversely proportional to the speed of movement of the MSN. The duration of connectivity is also affected by the MSN mobility scenario. Simulation of the movement of the MSN was performed according to 4 scenarios: "march", "random directions", "accidental wandering in the field" and "accidental wandering in the city". The longest duration of connectivity is observed in the third scenario, and the shortest in the second (with a fixed radius of the radio coverage area and the speed of the MSN). The average connection time of a TAP-MSN (pedestrian) connection in the case of "random directions" is up to 36 minutes, and the TAP-MSN (vehicle) connection is up to 5 minutes. The results obtained are used further in the method of increasing bandwidth based on TAP position control, which is discussed in Section 4.

The third section examines the analytical models for calculating traffic in the MWSN with TAP, analytical models for estimating the throughput of the MWSN with TAP and the average transmission delay in the routes of the MWSN with TAP. Simple mathematical models for calculating the intensity of traffic transmitted by MWSN channels with TAP, taking into account the peculiarities of the network (frequency distribution, MA), which allow to calculate the bandwidth of MWSN with TAP.

It is shown that the bandwidth of the data transmission route in the MWSN with TAP is determined by the minimum value of the bandwidth of the channel that is part of it. In this case, the MSN-TAP-MSN channels have a higher bandwidth than the MSN-MSN channels with the same traffic intensity in the range up to $24 \text{ pack.} / T$, which is determined by the minimum possible bandwidth level ($s^0 = 0,5$). In this case, to increase the bandwidth of the MWSN, it is more appropriate to transmit data over the TAP network, provided that the delay in packet transmission in the route does not exceed the specified.

If you want to send messages farther than a direct connection, then you need to use a packet retransmission mechanism through intermediate network nodes. The maximum communication range is determined by the set value of the value of

the delay of transmission of messages "from end to end" to ensure the required quality of service. For real-time applications of low interactivity (data, voice), the maximum number of retransmissions when transmitting messages over the MSN network at ($t_3^0 = 400\text{mc}$) should not exceed 14. To reduce the number of retransmissions, it is advisable to transmit packets over the TAP network. In this case, it is more profitable to retransmit packets inside the cell with the number of communication links more than 3, and through the TAP network - more than 4. This can be used to find the optimal route between a given pair sender-recipient.

The fourth section develops a method of increasing the bandwidth of the MWSN based on the use of TAP. The essence of the developed method is to systematize and combine into a single computational procedure mathematical models for assessing the structural connectivity of MWSM based on the use of TAP, quality indicators of MSN service, as well as an improved algorithm for finding the quasi-optimal position of TAP, to achieve bandwidth values time close to extreme.

It is shown that the problem of finding the connectivity matrix C_k (optimal location of TAP) belongs to the class of NP-complete. The use of classical methods for its solution leads to exponential complexity. The exact solution for MWSN with TAP with hundreds (thousands) of MSNs, requires considerable time. To reduce the complete list of TAP placement options, it is proposed to use a set of rules combined into a knowledge base that changes the connectivity of the MWSN network with TAP to increase the bandwidth of MWSN with TAP and reduce computation time. This contributes to obtaining in real time close to the optimal (quasi-optimal) solutions and the use of the proposed algorithm for operational control of the position of the TAP.

Evaluation of the effectiveness of the proposed method shows that its gain (relative to the basic strategy) averages 10-12%. The average deviation of the values of the bandwidth of the MWSN with TAP relative to the method of full search is 5-7%. The average value of the time to obtain a solution for the

developed method is 24 s, which with an average duration of connectivity between the MSN up to 350 s, allows you to control the position of the TAP in real time.

The main scientific and practical results of the dissertation are as follows:

- The mathematical model for assessing the connectivity of MWSN nodes with TAP has been improved. The essence of model improvement is a combination of a set of analytical models for assessing the reliability of the transmission of messages in radio channels with a set of proposed analytical models for predicting the movement of MSN. It is shown that the maximum range of MSN connectivity at the specified requirements to the MA protocol is up to 600 m for the MSN-MSN channel and up to 3000 m for the MSN-TAP channel. Based on the developed mathematical models of MSN displacement, the duration of direct connectivity of MWSN nodes with TAP was investigated. Thus, the duration of the connection TAP - MSN-pedestrian will be in the worst case an average of 36 minutes, and the connection TAP - MSN-vehicle - 5 minutes, which allows in practice to predict the time of MSN in the radio coverage area TAP and determine the frequency of change position of TAP in space.

- Mathematical models for estimating the functional indicators of MWSN with TAP, based on the calculation of network traffic and refined analytical ratios for estimating bandwidth and average transmission delay, are studied. It is shown that radio communication channels with TAP due to duplex communication organization have a 15% higher bandwidth than MSN-MSN channels at the same load.

- The algorithm for finding the quasi-optimal position of the TAP has been improved. The essence of the algorithm improvement is that when searching for the quasi-optimal position of TAP, it was possible to avoid a complete search of their placement options by applying pre-developed rules for selecting variants of such change of MWSN to TAP connectivity. The average value of the time to obtain a decision is 24s, which with an average duration of connectivity between the MSN to 350 s allows real-time control of the position of the TAP. The

deviation of quasi-optimal solutions from the optimal ones, which are obtained by the method of complete search, does not exceed 5-7%.

- For the first time a method of increasing the capacity of MWSN based on the use of TAP was developed. The difference between the developed method and the known methods is that the mathematical models for estimating the connectivity and quality of MSN service, as well as the improved algorithm for finding the quasi-optimal position of the TAP were first combined into a single computational procedure. This allows in the conditions of fast and unpredictable movement of MSN to reach values of throughput of MWSN close to extreme. The gain of the proposed method relative to the basic strategy of TAP position control is on average 10-12%.

The scientific results obtained in the dissertation can be used in the development of modern control systems MWSN with the use of TAP and increase the efficiency of their operation.

Keywords: bandwidth, connectivity, mobile wireless sensor network, telecommunication air platform, mobile sensor node, control, location.

Список публікацій здобувача в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, П.І. Кірчу, О.М. Тачиніна, В.І. Новіков. – К.: НАУ, 2016. – С.332. [1]

2. Tachinina, O. Mathematical Modeling of Motion of Iron Bird Target Node of Security Data Management System Sensors / O. Tachinina, O. Lysenko, I. Alekseeva, V. Novikov // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol-2711, pp. 482-491. [2]

3. Новіков В. І. Математичні моделі, методи і алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними

сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 3 2020 Частина 1. – С. 54 – 64. [3]

4. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами [Текст] / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи, 2017, № 2. С. 15-23. [4]

5. Лисенко О. І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища [Текст] / О. І. Лисенко, К. С. Козелкова, В. І. Новіков, Т. О. Прищепа, А. В. Романюк // Системи обробки інформації. - 2015. - Вип. 10. - С. 222-225. [5]

6. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Система стабілізації безпілотного літального апарата на траєкторіях баражування; № 112657 дата 10.10.2016. [6]

7. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 110683 дата 25.01.2016. [7]

8. Патент України на корисну модель; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 99483 дата 10.06.2015. [8]

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th

International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. C. 72– 75. [9]

10. Kashuba S. Hybrid Localization Method for Sensor Networks with Low Nodes Density / S. Kashuba, B. Trach, V. Novikov, T. Pryshchepa // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. C. 76– 79. [10]

11. Kashuba, S. V. Optimization of UAV Path for Wireless Sensor Network Data Gathering / S. V. Kashuba, V. I. Novikov, O. I. Lysenko, and I. V. Alekseeva // 2015 IEEE 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Proceedings. – 2015. - C. 280 – 283. [11]

12. Lysenko A.I. Analysis of options for construction of the satellite sensor systems / A.I. Lysenko, S.V Kashuba, T.A. Prishepa, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, S.V. Karmazyn // Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie:Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava ŠtefánikaKatedra bezpečnosti a obrany. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 346-351. [12]

13. Lysenko A.I. Improving efficiency wireless sensor networks with satellite information transmission channels / A.I. Lysenko, S.V Kashuba, T.A. Prishepa, V.I. Novikov, S.N. Chumachenko, O.P. Kutovy // Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie:Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava ŠtefánikaKatedra bezpečnosti a obrany. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 352-357. [13]

14. Lysenko A.I. Investigation of possible application of the protocol bfd to improving the reliability of wireless sensor networks / A.I. Lysenko, B.V. Trach V.I, T.A. Prishepa, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, A.N. Teslenko // Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie:Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava ŠtefánikaKatedra bezpečnosti a obrany. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 358-363. [14]

15. Lysenko O. Method of sensors location in the area of emergency based on compound dynamic system technology / O. Lysenko, V. Novikov, T. Prischepa, H. Tachinina, I. Uriadnikova // International Scientific Conference COMPLEX SYSTEMS SECURITY MANAGEMENT 2015 (23. - 27. februara 2015), Liptovsky Mikulas, Slovakia. pp. 226-231. [15]

16. Новіков В.І. Аналітична модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах завмирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів/ В.І. Новіков // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.34-37. [16]

17. Новіков В.І. Розвиток енергозберігаючого методу моніторингу цілей у зонах спостереження безпроводових сенсорних мереж/ В.І. Новіков, М.К. Спаравало, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.301-303. [17]

18. Новіков В.І. Підхід до побудови системи моніторингу цілей на основі застосування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Київ: ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ: Білорусь: БДАЗ; Кропивницький: ЛА НАУ, 2019. – С.199. [18]

19. Лисенко О. І. Метод підвищення ефективності безпроводових сенсорних мереж екологічного моніторингу, побудованих на радіогідроакустичних буях / О.І.Лисенко, В.І. Новіков, В.М.Петрова // Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація. Матеріали науково-практичного семінару. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2019. – С.95 - 97. [19]

20. Новіков В. І. Алгоритм мінімізації витрат енергоресурсу безпроводової сенсорної мережі / В. І. Новіков, О. І. Лисенко, С. М. Чумаченко, І. М. Давидов // Матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 7–8 лютого 2019 р. (Краків, Польща). – К. : НУХТ, 2019. – С.10 - 14. [20]

21. Новіков В.І. Метрика вартості з'єднання для маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В.І. Новіков // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2019: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.67-70. [21]

22. Лисенко О.І. Енергозберігаюча топологія для безпроводової сенсорної мережі моніторингу цілей / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // Проблеми інформатизації: Матеріали дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Київ : ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ: Білорусь: БДАЗ, 2018. – С.123-124. [22]

23. Романюк В.А. Система управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // XI Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С.28-32. [23]

24. Новиков В.И. Метод адаптивного управления маршрутизацией в условиях нестабильности связей между узлами беспроводной сенсорной сети / В.И. Новиков, А.И. Лысенко // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С.447-449. [24]

25. Новіков В.І. Розвиток методу підвищення часу функціонування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»

ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2015. – С.354-356. [25]

26. Лисенко О.І. Актуальні наукові задачі розвитку безпроводових сенсорних мереж / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2013: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2013. – С.227-229. [26]

Список публікацій здобувача, які додатково відображають наукові результати дисертації:

27. Новіков В. І. Методика синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, О.М. Тачиніна, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 4 2020. – С. 31 – 37. [27]

28. Лисенко О.І. Процедура синтезу топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів [Текст] / О.І. Лисенко, В.І. Новіков, В.М. Петрова, О.Г. Гуйда / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2018. Том 29 (68) № 6 2018 Частина 1. – С. 69 – 72. [28]

29. Новіков В. И. Метод адаптивного управления маршрутизацией в условиях нестабильности связей между узлами беспроводной сенсорной сети. Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2015. – Вип.10. – С. 137-144. [29]

30. Новіков В. І. Метрики вартості з'єднання та прогресу для вирішення завдань маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В. І. Новіков // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 2. - С. 96-108. [30]

31. Новіков В. І. Модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах великомасштабних завмирань і випадкового розкиду параметрів

приймально-передавачів / В. І. Новіков // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 1. - С. 143-152. [31]

32. Брагін А. С. Метод підвищення точності позиціонування мобільних абонентів / А. С. Брагін, В. І. Новіков, Т. А. Прищепа, Р. С. Понедільченко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2012. - Вип. 5. - С. 12-20. [32]

33. Патент України на корисну модель № 130356 «Спосіб визначення координат сенсорів бездротової сенсорної мережі» Автори: Лисенко О.І., Цуканов О.Ф., Якорнов Є.А., Новіков В.І. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.12.2018. [33]

34. Свідоцтво авторського права; Назва охоронного документу - Метод зниження енерговитрат польоту телекомунікаційної аероплатформи на базі безпілотного літального апарату; Науковий твір; № 3042 дата 22.07.2016. [34]

35. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб зниження енерговитрат польоту безпілотного літального апарату; № 109483 дата 25.08.2015. [35]

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ І МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ	30
1.1 Особливості побудови та функціонування МБСМ із ТАП.....	30
1.2 Аналіз задач управління мережею ТАП	38
1.3 Аналіз існуючих методів підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП	42
1.4 Загальна постановка задачі дослідження.....	45
1.5 Висновки до розділу 1	51
2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ.....	52
2.1 Вихідні дані та обмеження.....	52
2.2 Методика оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП.....	53
2.3 Математична модель оцінки максимальної дальності радіозв'язку в МБСМ із ТАП.....	55
2.4 Розрахунок тривалості зв'язності мобільних сенсорів у МБСМ із ТАП ..	62
2.4.1 Розрахунок тривалості зв'язності між МСВ у випадку прямої радіо видимості.....	63
2.4.2 Розрахунок тривалості зв'язності у випадку ретрансляції через проміжний МСВ (ТАП)	64
2.4.3 Моделювання переміщення вузлів мережі.....	69
2.5 Висновки до розділу 2	72
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ	74

	21
3.1 Вихідні дані, обмеження та допущення.....	74
3.2 Методика оцінки показників функціонування МБСМ із ТАП	75
3.3 Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах МБСМ із ТАП.....	76
3.4 Дослідження пропускної здатності каналів МБСМ із ТАП	77
3.5 Дослідження затримки передачі в каналах МБСМ із ТАП	88
3.6 Визначення кількості кінцевих МСВ в стільниках МСВ та ТАП.....	93
3.7 Висновки з розділу 3	95
4 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ.....	97
4.1 Постановка задачі у математичному вигляді	97
4.2 Метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП.....	99
4.3 Удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП	104
4.4 Оцінка ефективності запропонованого методу.....	119
4.5 Висновки до розділу 4	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
ДОДАТКИ.....	140
ДОДАТОК А.....	140
ДОДАТОК Б	141
ДОДАТОК В.....	142
ДОДАТОК Г	143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АБГШ – адитивний білий гаусів шум
АПР – адаптивний протокол із резервуванням
БПЛА – безпілотний літальний апарат
БСМ – безпроводова сенсорна мережа
МБС – мобільна базова станція
МБСМ – мобільна безпроводова сенсорна мережа
МД – множинний доступ
МДКН - метод доступу з контролем несучої
МС - мобільний сенсор
МСВ – мобільний сенсорний вузол
МКД – мінімальне кістякове дерево
МДСЗ – множинний доступ із сигналом «зайнято»
ОДЗ - область допустимих значень
ПЗ – пропускна здатність
СМО - система масового обслуговування
СУ – стратегія управління; система управління
ТАП – телекомунікаційна аероплатформа
ТАП ПЗ - телекомунікаційна аероплатформа підвищення зв'язності
FIFO – first input first output
MAC – media access control
NP – non polynomial
QoS – quality of service
PER – packet error rate
SNR – signal noise ratio
WSN – wireless sensor network

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру, військові конфлікти, які все частіше трапляються у нашому світі, призводять до часткового або повного виходу з ладу наземної інфраструктури, а саме телекомунікаційних споруд (радіорелейних та супутникових станцій, базових станцій стільникового зв'язку та ін.). Оперативне забезпечення зв'язку підрозділів рятувальних бригад та інших служб у таких ситуаціях можливе шляхом розгортання мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) на основі використання телекомунікаційних аероплатформ (ТАП) [36 - 39]. Мобільні сенсорні вузли (МСВ) МБСМ можуть вільно пересуватись в заданому районі та безпосередньо з'єднуватись між собою у зоні прямої радіовидимості, або шляхом ретрансляції повідомлень через сусідні мережеві вузли (якщо ці вузли здатні виконувати функцію мережевих маршрутизаторів), утворюючи в такому випадку багатоланкові мережі довільної структури. Для збільшення зони покриття МБСМ можна використати ієрархічну просторову організацію мережі із застосуванням ТАП, що виконують роль маршрутизаторів-ретрансляторів та поєднують між собою віддалені МСВ. Особливо актуальним є застосування ТАП на базі мініатюрних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що більш економічні та оперативні на відміну від великих аероплатформ [40 - 41].

Топологія МБСМ із ТАП носить динамічний характер та постійно розвивається, тому потребує ефективної системи управління (СУ), яка могла б оперативно реагувати на структурні та функціональні зміни в мережі, забезпечуючи ті чи інші цілі управління. Цілями управління в цьому випадку може бути забезпечення структурної надійності (зв'язності), якості маршрутів передачі даних між МСВ, підвищення пропускної здатності МБСМ та ін., а управляючими параметрами можуть виступати взаємне

положення вузлів, спрямованість діаграм наземних і бортових антен, потужність передавачів, навантаження та ін.

На сьогодні недостатньо розв'язаною є задача оптимального оперативного розміщення ТАП для підвищення пропускної здатності МБСМ із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності МСВ. Запропоновані методи, які закладаються в систему управління топологією (місцеположенням) ТАП, вирішують лише часткові задачі забезпечення зв'язності роз'єднаних компонентів мережі і не враховують обмеження на ємність каналних ресурсів, розподіл навантаження та обслуговування пакетів в вузлах мережі. Існуючі методи планування наземних БСМ через велику складність і час обчислення також не ефективні, що не дозволяє ТАП в режимі реального часу відпрацьовувати отримані рішення. Більшість методів також вирішують лише статичні задачі і не враховують характер мобільності МСВ та маневреність ТАП, тому підлягають вдосконаленню.

Тому розробка методу підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ з управлінням розташуванням телекомунікаційних аероплатформ у випадку швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних сенсорних вузлів є актуальною науковою задачею.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності МСВ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ.

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі ставилися і вирішувалися наступні взаємозалежні завдання дослідження:

1. Проаналізувати принципи функціонування і методи підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП.
2. Удосконалити математичну модель оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП, що дозволить визначати не тільки наявність зв'язності між ними, а й

прогнозувати її тривалість у випадку швидкої та непередбачуваної зміни положення МСВ.

3. Дослідити математичні моделі оцінки показників функціонування МБСМ із ТАП, а саме середню затримку передачі та пропускну здатність між заданою парою відправник-отримувач.

4. Удосконалити алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП, що дозволить в процесі поточного функціонування МБСМ із ТАП знаходити раціональні рішення задачі управління положенням ТАП при зміні умов функціонування мережі (відмови МСВ, ТАП, зовнішні збурення, непередбачувані переміщення МСВ).

5. Розробити метод підвищення пропускну здатності МБСМ на основі використання ТАП із управлінням положенням ТАП, що дозволить систематизувати існуючі і запропоновані моделі та алгоритми.

6. Провести оцінку ефективності запропонованого методу.

Об'єкт досліджень – процес функціонування мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами.

Предмет досліджень – методи підвищення пропускну здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ.

Методи дослідження. Для вирішення наукової задачі в дисертаційній роботі були використані методи теорії графів (для розробки математичної задачі дослідження), теорії телекомунікаційних мереж (для розрахунку інтенсивності трафіку в радіоканалах МБСМ із ТАП), математичного моделювання (для розробки математичних моделей переміщення МСВ), теорії масового обслуговування (для дослідження аналітичних моделей показників функціонування МБСМ із ТАП) та теорії оптимізації (для розробки алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП).

Наукова новизна отриманих результатів. Нові наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, наступні:

1. Вперше розроблено метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП з управлінням положенням ТАП.

Відмінність розробленого методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП від відомих, що визначає його новизну, полягає в тому, що математичні моделі оцінки структурно-функціональної зв'язності МСВ та удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП вперше були об'єднані в єдину обчислювальну процедуру, що дозволяє досягати значень пропускної здатності МБСМ із ТАП близьких до екстремальних в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ. Застосування методу дозволяє отримати вигоду у пропускній здатності МБСМ із ТАП на 10-12% у порівнянні із відомими методами.

2. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП.

Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності МСВ МБСМ із ТАП, що визначає її новизну, полягає в тому, що вперше запропоновано об'єднати сукупність аналітичних моделей оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах мережі із сукупністю аналітичних моделей прогнозування переміщення МСВ. Це дозволило не тільки оцінювати наявність зв'язності з заданої достовірністю, а й прогнозувати її тривалість у випадку швидкої та непередбачуваної зміни положення МСВ. Отримані аналітичні моделі прогнозування переміщення МСВ дозволяють здійснювати імітаційне моделювання середнього часу їх перебування в зоні радіо покриття ТАП та визначати необхідну частоту зміни положення ТАП у просторі.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП.

Суть удосконалення алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, що визначає його новизну, полягає в тому, що в ньому вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення ТАП завдяки використанню попередньо розробленим правилам відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищує її пропускну здатність, а також зменшує час обчислень, що дозволяє отримати в режимі реального часу

рішення, що близькі до оптимальних і використовувати алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Відхилення квазіоптимальних рішень від оптимальних, які були отримані методом повного перебору, не перевищує 5-7%.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Окрім одноосібних статей [29, 30, 31], у спільних наукових працях здобувачеві належить наступне: в [1] – удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення безпілотних авіаційних комплексів; в [2] – здійснено математичне моделювання руху вузла цілі (мінідрону) по колу, на стенді напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи; в [3] – розроблено метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами; в [4] – запропоновано нову функціональну модель системи оперативного управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами; в [5] – запропоновано удосконалену функціональну модель системи управління безпроводової сенсорної мережі із самоорганізацією, в [27] – здійснено імітаційне моделювання вдосконаленої системи керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі; в [28] – запропоновано нову математичну модель процедури побудови енергозберігаючої топології безпроводової сенсорної мережі; в [29] – запропоновано архітектуру сенсорного мережевого вузла з компонентами інтелектуалізації процесів прийняття рішення, в [30] – отримані нові вирази для математичного сподівання кількості переданих пакетів в залежності від надійності безпроводового з'єднання, в [31] – запропоновано аналітичну модель радіочастотного каналу безпроводової сенсорної мережі в умовах великомасштабного завмирання і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів, в [32] – запропоновані способи підвищення точності позиціонування мобільних абонентів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні теоретичні положення та результати роботи доповідалися на наступних науково-технічних і науково-практичних конференціях та семінарах: International Scientific Conference COMPLEX SYSTEMS SECURITY MANAGEMENT 2015 (Словачія, м. Ліптовський Мікулаш, Академія Збройних Сил генерала М.Р. Штефаніка, 23 – 27 лютого 2015 р.), 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (Україна, м. Київ, НАУ, 13-15 жовтня 2015р.), 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016) (Україна, м. Київ, НАУ, 18-20 жовтня 2016р.), VII, IX, X, XI, XII, Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми телекомунікацій» (Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 16-19 квітня 2013р., 21-24 квітня 2015 р., 19-22 квітня 2016 р., 16-20 квітня 2017 р., 18-21 квітня 2018 р.); XIII, XIV Міжнародні науково-технічні конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» (Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 15-19 квітня 2019 р., 13-17 квітня 2020 р.); XII, XIII міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми інформатизації» (Україна, м. Київ, ДУТ, 12 – 13 грудня 2018 р., 11-12 квітня 2019р.); I міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій» (Україна, м. Київ, НУХТ, 7–8 лютого 2019 р.); Науково-практичний семінар «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (Україна, м. Харків, Національний університет цивільного захисту України, 21 лютого 2019 р.).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідної роботи КПІ ім. Ігоря Сікорського за тематикою держбюджетних НДР № держреєстрації 0115U000269 «Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища» [42] і № держреєстрації 0117U004282 «Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними

сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації» [43].

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в тому, що розроблені математичні моделі, алгоритми і метод дозволяють:

- 1) кількісно оцінювати вплив мобільності вузлів МБСМ із ТАП на тривалість зв'язності між МСВ;
- 2) визначати раціональне положення ТАП для досягнення якомога більших значень пропускну здатності МБСМ із ТАП;
- 3) здійснювати в режимі реального часу управління положенням ТАП;
- 4) підвищувати ефективність систем управління мережею ТАП.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в діяльність

1. Інституту проблем математичних машин і систем НАНУ (додаток А);
2. Військового інституту телекомунікацій та інформатизації (додаток Б);
3. Асоціації фахівців Цивільного захисту (додаток В).

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес інституту телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського (додаток Г).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 143 сторінки, 42 ілюстрації, 3 таблиці, список літератури, що включає 90 найменувань, 4 додатка на 4 сторінках.

1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ І МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

В даному розділі проведено аналіз особливостей побудови та функціонування мобільних безпроводових сенсорних мереж (МБСМ) із телекомунікаційними аероплатформами (ТАП), задач управління МБСМ із ТАП, а також методів підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП. Визначено основну задачу дослідження і в загальному вигляді зроблено її постановку.

1.1 Особливості побудови та функціонування МБСМ із ТАП

Приклад побудови архітектури МБСМ із ТАП наведено на рис. 1.1

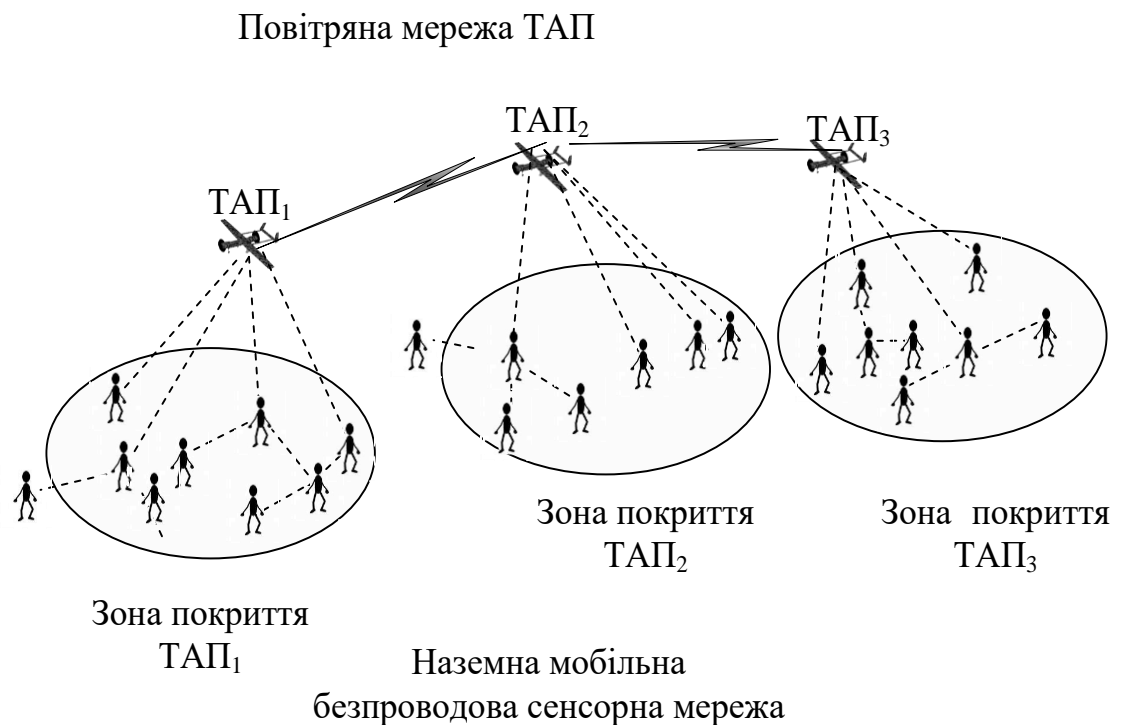


Рисунок 1.1 - Приклад архітектури дворівневої МБСМ із ТАП

Перший рівень МБСМ із ТАП (рівень датчиків первинної інформації) складається із кластерів (угруповань) мобільних сенсорних вузлів (МСВ).

Другий (повітряний) складається з ТАП опорної мережі, які призначені для забезпечення зв'язності віддалених кластерів МСВ (ТАП_{*i*}, $i=1, \dots, m$) та ТАП підвищення зв'язності (ТАП ПЗ j , $j=1, \dots, p$) «проблемних» кластерів МСВ (наприклад, між кластерами Ω_1 та Ω_2 або Ω_4 , Ω_5 та Ω_6 , як показано на рис.1.2).

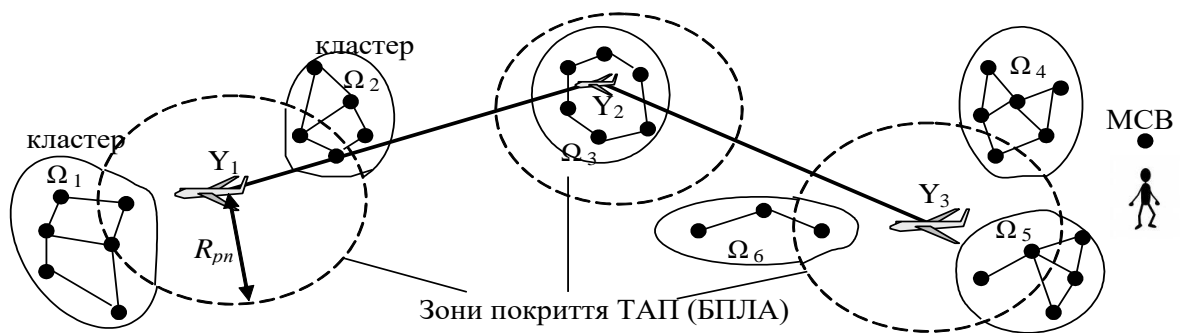


Рисунок 1.2 - Схема розташування мережі ТАП та ТАП ПЗ

Кожна ТАП і кожна ТАП ПЗ оснащуються двома комплектами антенних систем та приймально-передавальної апаратури (для зв'язку з МСВ та для зв'язку між ТАП), мережевим маршрутизатором, GPS-навігатором, буферним запам'ятовуючим пристроєм. Виділяють 3 різні функціональні можливості ТАП:

- ТАП–міст;
- ТАП–маршрутизатор;
- ТАП–шлюз.

Найбільш складну структуру має ТАП–шлюз. Він забезпечує виконання широкого переліку операцій з обробки повідомлень та може виступати в якості пристрою для спряження з зовнішньою мережею. ТАП–міст забезпечують ретрансляцію, а ТАП–маршрутизатор - маршрутизацію повідомлень в межах однієї МБСМ із ТАП. Найбільш раціональним

варіантом ТАП є такий, коли кожна ТАП буде поєднувати усі вищевказані функціональні можливості.

Кінцевими пристроями МБСМ із ТАП є МСВ (рис.1). Вони мають бути оснащені:

- двома комплектами приймально-передавальної апаратури (для зв'язку між МСВ та для зв'язку з ТАП). Застосування двох окремих радіо інтерфейсів дозволяє передавати повідомлення, як через наземну МБСМ, так і через мережу ТАП, що створює більшу кількість маршрутів між парою МСВ. Другою перевагою застосування окремих радіо інтерфейсів є використання різних частотних смуг на кожному з інтерфейсів, що забезпечує кращу якість обслуговування та балансування навантаження в мережі;

- мережевим мостом-маршрутизатором, для здійснення ретрансляції та маршрутизації повідомлень, призначених іншим МСВ;

- засобами перетворення інформації у зручний для користувача вид (дані, голос, відео).

В МБСМ із ТАП використовуються наступні методи передачі інформації між МСВ:

- 1) передача повідомлень між МСВ (без застосування ТАП);
- 2) ретрансляція повідомлень одержувачу через ТАП у випадку, якщо і джерело повідомлення і одержувач знаходяться в межах зони радіо покриття одної ТАП;
- 3) зв'язок через проміжні МСВ, які називають базовими вузлами. В цьому випадку кожне повідомлення, що поступило у ТАП, обов'язково передається базовому вузлу, що визначає подальший маршрут проходження повідомлення;
- 4) ретрансляція з перенесенням в запам'ятовуючий пристрій ТАП. В цьому випадку повідомлення приймається ТАП від джерела повідомлення, зберігається в його запам'ятовуючому пристрої, та передається споживачеві під час прольоту ТАП над споживачем;

5) зв'язок із застосуванням міжстанційних каналів між ТАП.

Найбільш корисним є об'єднання 1, 2 та 5-го методів. При цьому можливі два наступні варіанти організації каналів. У першому варіанті повідомлення між двома МСВ передається через мережу з багатократним перевипромінюванням ТАП по радіоканалах, що створюються тільки на час передачі повідомлення. У другому варіанті між всіма МСВ, які спостерігають один одного, створюються магістральні канали, по яких, в разі необхідності, передаються повідомлення. Кожний з цих двох варіантів має свої достоїнства і недоліки.

Достоїнства першого варіанту - простота реалізації, можливість використання одного комплексу приймально-передавальної апаратури ТАП для зв'язку з МСВ і з сусідніми ТАП. Проте економне використання ресурсу каналів ускладнює процес входження в зв'язок і супроводжується труднощами при багатократній організації множинного доступу. Такий варіант є достатньо ефективним при малої та середньої інтенсивності вхідного трафіку (вхідному навантаженню мережі) і, як буде показано далі, неефективний при великій інтенсивності вхідного трафіку.

У разі великого вхідного трафіку доцільно використання магістральних каналів зв'язку. При цьому збільшення пропускної здатності досягається шляхом п'яти-шести кратного збільшення кількості приймально-передавальної апаратури на борту ТАП, що викликає необхідність усунення взаємного впливу магістральних каналів між собою, а також взаємних завад повідомлень у середині магістральних каналів.

Особливістю функціонування МБСМ із ТАП є динамічна зміна її топології (як за рахунок переміщення МСВ, так і ТАП). Тому, при проектуванні МБСМ із ТАП, виникають наукові задачі щодо підвищення ефективності пакетної передачі повідомлень, організації множинного доступу МСВ до МБСМ, визначення маршрутів для передачі повідомлень через мережу шляхом ретрансляції повідомлень через проміжні вузли, управління топологією (місцеположенням) ТАП.

При *пакетній передачі повідомлень* кожне повідомлення розбивається на інформаційні пакети. Пакетний метод передачі повідомлень дозволяє підвищити пропускну здатність мережі за рахунок одночасного обслуговування великої кількості МСВ.

Організація користування мережею великою кількістю МСВ та взаємодії ТАП з ними та між собою здійснюється відповідно до правил, що називаються протоколами множинного доступу (МД), які можна розділити на: випадкові, детерміновані та гібридні [44].

Детерміновані протоколи упорядковують роботу МСВ та ТАП таким чином, що повністю усуваються конфлікти, при яких два або більш МСВ (ТАП) одночасно передають повідомлення одному й тому ж МСВ. В таких протоколах усунування конфліктів здійснюється за рахунок статичного або динамічного закріплення часового (TDMA), частотного (FDMA), просторового (SDMA), кодового (CDMA), або гібридного (TDMA/CDMA, STDMA) ресурсів каналів за МСВ і ТАП та вимагає високого рівня організації управління мережею.

Протоколи з випадковим доступом допускають виникнення конфліктів, тобто зіткнення пакетів в радіоканалах. Історично першим методом з випадковим доступом вважається метод АЛОНА. Він ефективно працює у випадках невеликого завантаження в мережі, коли втрата частини пропускну здатності мережі через зіткнення пакетів виявляється меншою за втрати, що пов'язані з простоєм мережевого ресурсу. При великій кількості пакетів виникає ситуація, коли вузол мережі не в змозі ні прийняти пакет, ні передати його далі. Ця проблема частково вирішується шляхом тактування випадкового доступу, при якому всі мережеві вузли починають передавати пакети з настанням чергового такту (метод S-ALOHA). Часовий інтервал між тактами покриває тривалість пакету і максимальний час його поширення в просторі. В цьому випадку при одночасному зверненні до вузла декількох інших мережевих вузлів буде прийнятий пакет від найближчого вузла, тобто

той, що поступив раніше та з більш потужним сигналом, а решту пакетів буде відхилено.

Для зниження ймовірності виникнення конфліктів використовують методи доступу з контролем несучої (МДКН), що використовують попередню перевірку стану радіоканалу. В цьому випадку перед передачею пакету вузол здійснює контроль стану каналу (наявність в ньому несучої або самої передачі пакету). Якщо канал зайнятий, то вузол відкладає передачу пакету на більш пізній час. При звільненні каналу передача пакету може починатися наступними способами: відразу, використовуючи «жорсткий» МДКН, через випадковий інтервал часу, використовуючи «м'який» МДКН, з рандомізацією часу передачі на сегменти або з ймовірністю p (p -наполегливий) [45].

Для вирішення проблем «відкритого» та «схованого» терміналів запропоновані методи (протоколи) МД з контролем несучої та запобіганням конфліктів (CSMA/CA). Найбільш відомі з них – це FAMA, MACA, MACA-BI, MACAW, DBTMA та IEEE 802.11 DCF [44]. При застосуванні вказаних методів радіоканал тимчасово резервується на період передачі пакету повідомлення за допомогою обміну між відправником та одержувачем короткими службовими пакетами: запитом відправника на передачу (RTS) та згодою одержувача (CTS).

Загальну характеристику протоколів канального рівня доцільних для використання в БСМ із МСВ та ТАП, наведено в табл. 1.1.

Аналіз таб. 1.1 показує, що в умовах високої мобільності МСВ, що характерно для МБСМ із ТАП, перевагу має набір протоколів IEEE 802.11. Також дослідження в роботі [46] засвідчують про можливість застосування протоколів IEEE 802.11 не тільки всередині будівлі, а й зовні. При радіусі стільника до 6 км функціонування протоколу підрівня доступу MAC відповідає усім нормам стандартів 802.11.

Окрім цього на підрівні доступу MAC повинні вирішуватися такі важливі задачі як аутентифікація, синхронізація, шифрування, управління

енергозбереженням, роумінг та ін. Особливу увагу слід звернути на роумінг, тобто процедуру входу МСВ у зону обслуговування ТАП, перехід МСВ від однієї зони ТАП до іншої та переключення МСВ між зонами ТАП при знаходженні МСВ одночасно в зонах обслуговування декількох ТАП.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики існуючих протоколів канального рівня безпроводових мереж [1]

“Основні характеристики	Протокол каналного рівня			
	IEEE 802.11	IEEE 802.16	HiperLAN2	Bluetooth
Частота, ГГц	2.4 / 5.1	2 – 66	5.1	2.4
Відстань, м	До 500 /до 100	100 – 20000	До 250	10...100
Швидкість передачі в каналі,Мбіт/с	1 / 2 / 11 / 54	120	54	0.7...1
Метод доступу до каналу	DFWMAC (CSMA/CA)	OFDMA/TDMA / TDD	Polling / TDD	
Тип управління, організація мережі	Децентралізова не, всі вузли одного рівня	Зонове (кластерізація мережі), централізоване управління ресурсами в кожній зоні (пікомережі)		
Мобільність вузлів	Легко реалізується на мережевому рівні	Ускладнена, викликає необхідність перебудови зон мережі		
Пропускна спроможність мережі	Обмежена взаємними завадами	Визначається конфігурацією мережі, час реконфігурації мережі – значний” [1]		

Визначення маршруту для кожного пакету є складною операцією і може здійснюватися як бортовими комплексами ТАП, так і МСВ [29, 30]. Відзначимо, що маршрутизатори МБСМ і ТАП мають однакові функціональні властивості, що дозволяє використовувати існуючі протоколи маршрутизації та надає можливість відмовитись від використання допоміжного протоколу, якій узгоджує прибуття та відліт ТАП з протоколом маршрутизації [47].

В теперішній час для використання в МБСМ із ТАП запропоновані методи (протоколи) маршрутизації, які по способу побудови та підтримки маршрутів класифікуються на наступні основні групи [48]:

- таблично-орієнтовні (OLSR, DSDV, WRP, та ін.);
- зондові (AODV, TORA, DSR, та ін.);
- гібридні (R-зоновий, ZRP та ін.)

При застосуванні таблично-орієнтовних протоколів маршрутизації кожен вузол на основі періодичного обміну із сусідніми вузлами вмістом таблиць маршрутизації будує власну таблицю маршрутизації, що вміщає по критерію мінімальної вартості найкоротші шляхи до усіх інших вузлів, де під вартістю може розумітися число ретрансляцій (хопів), час доставки, затрачена потужність передавача та ін.

При використанні протоколів зондової маршрутизації мережеві вузли формують маршрут передачі повідомлень по мірі необхідності, шляхом хвильової розсилки по мережі зондів-запитів (службових пакетів малого розміру) та збору зондів-відповідей, які вміщують інформацію про найкоротші маршрути передачі інформації за вибраним критерієм. Ця розсилка продовжується до тих пір, поки не буде встановлено маршрут до необхідного вузла призначення. Також розсилка знов відновлюється, якщо встановлений маршрут втрачається. Зазначені протоколи ідеально підходять для застосування у МБСМ із ТАП, оскільки підтримують усі можливі випадки використання ТАП для підвищення зв'язності МСВ. Переміщення ТАП у зазначене місце призначення еквівалентне введенню в МБСМ із ТАП

нового транзитного мережевого вузла. При пошуку маршрутів між вузлами МБСМ кластеру 1 та кластеру 2 (рис. 1.2) шляхом розсилки зондів-запитів будуть встановлені маршрути із використанням ТАП Y_1 . Коли «проблемну» гілку мережі буде відновлено (тобто відбудеться з'єднання між собою кластерів Ω_1 та Ω_2) ТАП може покинути заданий район баражування, а втрачені мережеві маршрути завдяки використанню принципу «on-demand» можуть бути легко відтворені через проміжні МСВ.

В цілому МБСМ із ТАП у порівнянні із існуючими системами передачі інформації характеризуються значно вищою складністю і рівнем організації.

Основними особливостями аналізу і синтезу МБСМ із ТАП є:

1. Складність структури мережі: радіоканали між МСВ-джерелом повідомлення і ТАП, між ТАП, між ТАП і МСВ-одержувачем повідомлення є складними системами передачі інформації.

2. Зміна топології МБСМ із-за руху МСВ обумовлює нестійкість зв'язності, складність маршрутизації, виникнення доплерівських зсувів несучих частот.

3. Функціонування МБСМ із ТАП потребує ефективну систему управління [4, 5, 50], складовою частиною якої є підсистема управління мережею ТАП.

1.2 Аналіз задач управління мережею ТАП

Задачі управління мережею ТАП за етапами розділяються на задачі планування, розгортання та оперативного управління [50].

Етап планування здійснюється центром управління МБСМ із ТАП.

Виходячи із прогнозу обстановки та наявних ресурсів змістом планування є:

1. Планування топології мережі ТАП, що реалізує певну мету управління, на основі вимог до параметрів МБСМ та вимог щодо передачі повідомлень [28].

2. Розподіл апаратурних, частотних, енергетичних, просторових ресурсів мережі ТАП, визначення методів, алгоритмів управління, параметрів і режимів роботи технічних засобів.

Етап розгортання полягає в запуску заданої кількості ТАП та в управлінні їх польотом у задані райони баражування. При цьому деякі задачі етапу розгортання (наприклад, перепланування топології) мережі ТАП можуть виконуватися під час оперативного управління при значних змінах топології мережі (введенні нових угруповань МСВ, ушкодження МСВ та ін.). Контроль за польотом ТАП та за роботою його бортових систем здійснює центр управління (ЦУ) мережею [27].

На етапі оперативного управління здійснюється оцінка стану МБСМ із ТАП за прийнятими критеріями ефективності і, відповідно до плану та реальної обстановки, приймаються міри по підтримці показників ефективності функціонування МБСМ із ТАП в заданих межах або їх оптимізації. На відмінність від задач планування, задачі оперативного управління вирішуються у режимі реального часу змішаним способом (централізовано/децентралізовано), а за своїм змістом їх можуть багаторазово повторювати.

По функціях задачі управління мережі ТАП діляться на дві наступні групи:

1. К спеціальним задачам управління відносяться визначення маршрутів польоту ТАП та координація їхнього переміщення [51].

2. К універсальним задачам управління, що характерні для будь-якої МБСМ із ТАП [52], відносяться управління топологією, управління навантаженням, управління маршрутизацією, управління енергоресурсом, управління радіоресурсом, управління безпекою [29]. Конкретна реалізація методів управління кожної підсистеми повинна враховувати призначення ТАП-мережі і особливості її архітектури (мобільність, продуктивність, розмірність та ін.).

Функціональну модель системи управління мережею ТАП [4, 5] представлено на рис. 1.3:



Рисунок 1.3 - Функціональна модель системи оперативного управління мережею ТАП

Ефективність функціонування системи управління мережею ТАП в загальному випадку оцінюється за векторним критерієм $K = [K_1, K_2, \dots, K_n]$:

– $K_1 = [K_1^1 K_1^2 K_1^3]$ – якість маршрутів всієї МБСМ із ТАП або її частини (зони) (K_1^1 – довжина маршрутів передачі повідомлень в зонах МБСМ із ТАП, K_1^2 – середній час доставки повідомлень, K_1^3 – пропускна здатність мережі тощо);

– K_2 – пропускна здатність всієї МБСМ із ТАП або її окремої зони;

– K_3 – ступінь покриття зонами ТАП фіксованої кількості або виділених, пріоритетних МСВ;

– K_4 – структурна надійність (зв'язність);

– K_5 – кількість ТАП і т.д.;

Наявність сукупності критеріїв ефективності функціонування системи управління обумовлює багатокритеріальний характер задач управління і ускладнює розробку формальних методів. Для пошуку компромісного управління пропонується використати метод ведучого критерію, для якого

виходячи з поточної ситуації визначається головний критерій ефективності, який підлягає оптимізації, а інші критерії вважаються обмеженнями. Для визначення ведучого критерію пропонується використати метод ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив [53].

Однією з головних задач управління мережею ТАП є задача управління топологією (місцеположенням) мережі ТАП. Згідно [50] *першочерговою метою* управління топологією (місцеположенням) мережі ТАП є підвищення пропускної здатності МБСМ з одночасним забезпеченням структурної зв'язності МСВ і якості обслуговування МСВ. Тому головним критерієм ефективності управління місцеположенням ТАП пропонується вибрати пропускну здатність МБСМ, а інші критерії перевести в розряд обмежень. Тоді *управління місцеположенням ТАП* буде здійснюватися за наступними етапами: планування (перепланування), розгортання, оперативне управління місцеположенням ТАП.

На *етапі планування (перепланування)* МБСМ із ТАП центр управління (ЦУ) здійснює:

- збір інформації про початкову топологію мережі, збір інформації про функціонування мережі та введення вихідних даних;
- розрахунок параметрів та тривалості структурної зв'язності мережі, параметрів якості маршрутів за допомогою існуючих та удосконалених математичних моделей, що розглядаються в наступних розділах;
- аналіз виконання умов щодо наявності структурної зв'язності і якості маршрутів в мережі;
- розрахунок пропускної здатності мережі S , відповідно до математичної моделі, що розглядається в розділі 4.
- пошук початкового (наступного) розміщення чергової ТАП, що максимізує пропускну здатність мережі (при наявності можливих рішень), шляхом використання запропонованого алгоритму, що розглядається в розділі 4.

На *етапі розгортання* ТАП здійснюється:

- вивід (переміщення) ТАП в точку початкового (наступного) розміщення.
- корегування маршрутів передачі повідомлень та навантаження в радіоканалах.

На *етапі оперативного управління* ТАП здійснюється:

- адаптація функціонування ТАП до реальних умов роботи (рівня трафіку, створюваного кожним МБСМ).
- періодична перевірка необхідності зміни ТАП своєї позиції (при цьому положення усіх вузлів МБСМ із ТАП вважається фіксованим в заданий момент часу).

Дані етапи реалізуються для кожної ТАП відповідно до методу, що запропоновано в розділі 4, в залежності від швидкості зміни топології мережі.

1.3 Аналіз існуючих методів підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП

На сьогодні найбільш перспективними для використання у зоні стихійного лиха вважаються МБСМ із ТАП класу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [54]. Останнім часом зростає увага до малих БПЛА (МБПЛА), які є більш дешевими, простими в експлуатації та не потребують спеціальної пускової установки або злітно-посадочної смуги [55]. МБСМ із ТАП типу МБПЛА, що оснащені засобами зв'язку, можуть більш якісно досліджувати важкодоступні райони (в зонах техногенних катастроф, стихійних лих тощо) і підвищувати ефективність функціонування наземних МБСМ.

Приклад МБПЛА (модель R-100 ТОВ «Юавіа» (м.Київ)) зображено на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 - Мініатюрний БПЛА (R-100) виробництва компанії «Юавіа» [1]

На сьогодні недостатньо розв'язаною є задача оптимального оперативного розміщення множини ТАП для підвищення пропускної здатності МБСМ із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності МСВ.

Забезпеченню зв'язності мереж приділяють останнім часом значну увагу, в тому числі і в контексті МБСМ. В [56] показано, що використання розосередженої мережі базових станцій (МБС) може суттєво підвищити зв'язність мережі. В [57] авторами визначається критична потужність, з якої вузол має передавати повідомлення в мережі, щоб забезпечити зв'язність мережі із ймовірністю 1, у випадку коли кількість мережевих вузлів прямує до нескінченності.

Міллером в [58] прораховано ймовірність того, що два мережевих вузла можуть бути краще з'єднані двох-стрибковим шляхом ніж напряму. В роботі [59] авторами вивчено, яким має бути діапазон передачі, що забезпечує зв'язність мережі з більшою ймовірністю.

В [60] авторами показано, що в мережі з N вузлами, що розміщені випадково, якщо кожен мережевий вузол з'єднаний з менше ніж $0,074 \log N$ сусідніми мережевими вузлами, то мережа є асимптотичне роз'єднаною з ймовірністю 1 при зростанні N . У випадку, коли мережевий вузол зв'язаний більш ніж з $5,1774 \log N$ сусідніми мережевими вузлами, тоді вважається, що мережа є асимптотичне з'єднаною при зростанні N з ймовірністю 1.

В [61] авторами досліджено, як розмістити додаткові вузли в мережі так, щоб нарощена мережа була зв'язною. Хуллером в [62] вивчено проблему підвищення зв'язності та визначено сукупність ребер мінімальної ваги, яку потрібно додати, для того, щоб створити k -зв'язний граф. В роботах [63] та [64] наведено аналітичні вирази, що дають змогу визначити потрібну сукупність вузлів, за допомогою якої утворюється при заданій густині майже без сумніву k -зв'язна мережа. В роботі [65] запропоновано методи управління зв'язністю МБСМ на основі управління маршрутизацією повідомлень та потужністю вузлів. В роботі [66] запропоновано управління зв'язністю МБСМ на основі управління діаграмою спрямованості антен вузлів мережі.

Проблема підвищення пропускної здатності МБСМ за допомогою ТАП також вивчається вітчизняними та зарубіжними науковцями. Шляхи підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП на основі покриття ТАП максимальної кількості наземних вузлів представлені у роботах [47], [50 - 51], [67]. Підвищення пропускної здатності БСМ за допомогою одного БПЛА досліджується в роботі [55]. Підвищення пропускної здатності БСМ шляхом управління навантаженням в вузлах мережі досліджено у роботах [68] – [71].

Отже існуючи методи, що запропоновані для системи управління топологією (місцеположенням) ТАП, вирішують тільки часткові задачі, що забезпечують геометричну зв'язність роз'єднаних компонентів МБСМ та не враховують обмежену ємність каналних ресурсів, розподіл навантаження та обслуговування пакетів в МСВ. Існуючи методи планування БСМ із стаціонарними сенсорними вузлами також не є ефективними, оскільки вони

мають велику складність і час обчислення, що не дозволяє ТАП в режимі реального часу відпрацьовувати отримані рішення. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, та не враховують мобільність МСВ та маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню.

Отже розробка методу підвищення пропускну здатності МБСМ на основі використання ТАП з управлінням розташуванням ТАП у випадку швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ є актуальною науковою задачею.

1.4 Загальна постановка задачі дослідження

Для постановки математичної задачі дослідження в загальному вигляді розглянемо функціональну модель МБСМ із ТАП (рис. 1.5).

1-й рівень МБСМ із ТАП представлено мережею МСВ, які довільним чином можуть переміщуватися в деякому районі r . Для зв'язку між собою МСВ використовують спільний широкомовний радіоканал на частоті f_1 при наявності прямої видимості, а при її відсутності передача повідомлень здійснюється через проміжні вузли. МСВ - це багатофункціональні пристрої, що поєднують у собі приймально-передавач, модем, кодек, маршрутизатор та запам'ятовуючий пристрій, та працюють в одночастотному напівдуплексному режимі за принципом з проміжним зберіганням «store-and-forward». Для передачі повідомлень через ТАП кожен МСВ має також другий комплект обладнання, що працює у дуплексному двохчастотному режимі з частотами f_2 - f_3 . [3]

2-й рівень МБСМ із ТАП складає мережа ТАП, що баражують по колу мінімального радіусу на висоті h навколо проекцій точок свого оптимального розміщення з координатами $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$, де K – кількість ТАП, та утворюють стільники радіусом R . Бортова апаратура ТАП представляє собою також складний багатофункціональний пристрій з окремими

радіоінтерфейсами (для зв'язку з МСВ та ТАП між собою), здатний ретранслювати повідомлення в середині стільника або за його межі. [3]

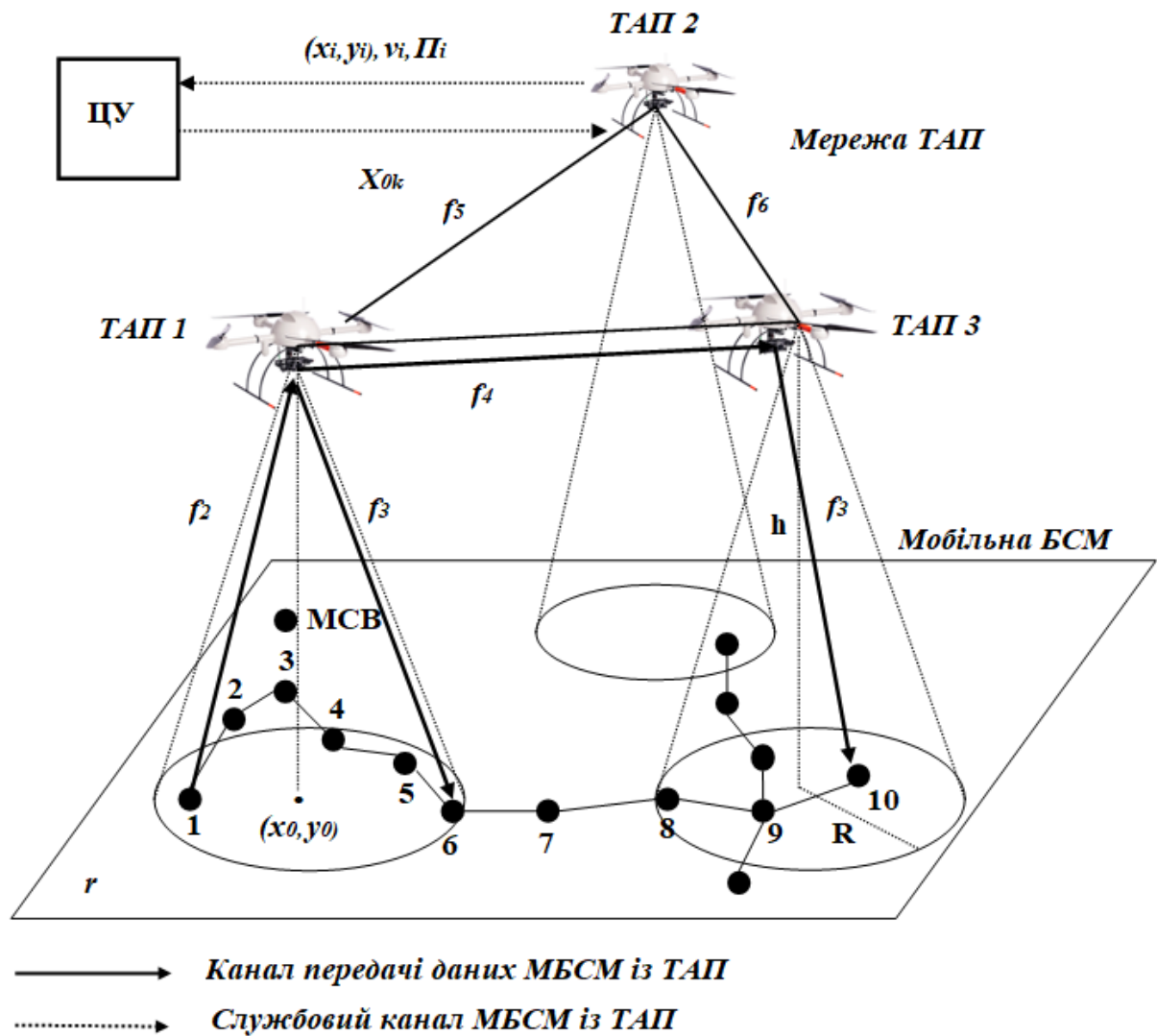


Рисунок 1.5 - Функціональна модель МБСМ із ТАП

В міжстільникових з'єднаннях (ТАП-ТАП) використовується дуплексний режим із частотним ущільненням, із застосуванням набору несучих частот, що розподілені за стільниковим принципом, та окремого демодулятора на кожній частоті. За допомогою спільного передавача повідомлення направляються сусіднім ТАП згідно з наявними запитами в режимі розділення в часі. Вважається, що кожна ТАП має інформацію про своє місцезнаходження і про розподіл частот по стільникам, що дозволяє ТАП

при зміні свого положення визначити, яку з частот слід використовувати в даний момент часу.

В МБСМ із ТАП можливі наступні варіанти маршрутів передачі повідомлень між МСВ (наприклад, між $МСВ_1$ та $МСВ_{10}$):

- 1) через мережу МСВ ($МСВ_1-МСВ_2-...-МСВ_{10}$);
- 2) через мережу ТАП ($МСВ_1-ТАП_1-ТАП_3-МСВ_{10}$);
- 3) змішаним шляхом ($МСВ_1-ТАП_1-МС_6-МС_7-...-МС_{10}$).

До маршруту між визначеною парою відправник a – одержувач b , висуваються наступні *вимоги* стосовно:

1) $s_{m\ ab}$ - пропускної здатності маршруту m_{ab} : $s_{m\ ab} \geq s^0, a, b = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, де N – кількість МСВ в МБСМ із ТАП, M – кількість маршрутів в МБСМ із ТАП, s^0 – мінімальний допустимий рівень пропускної здатності маршруту;

2) $t_{z\ ab}$ - затримки передачі (або кількості ретрансляцій) в маршруті:
 $t_{z\ ab} \leq t_z^0 (l(m_{ab}) \leq l^0)$;

3) $d_{ij}(D_{ik})$ - структурної зв'язності на всіх ділянках маршруту:
 $d_{ij} \leq d^0 (D_{ik} \leq D^0) \forall ij \parallel ik \in m_{ab}, i, j, a, b = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$, де d_{ij} – відстань між МСВ, d^0 - відповідне обмеження зверху, а D_{ik}, D^0 – відстань між МСВ та ТАП та відповідне обмеження зверху;

4) $T_{ze\ ij}$ - тривалості зв'язності для кожної ділянки ij маршруту:
 $T_{ze\ ij} \geq T_{ze}^0$, де T_{ze}^0 - мінімальне значення часу, на протязі якого ТАП здатне відпрацювати задане розміщення в просторі, встановити маршрути та передати мінімальну кількість повідомлень. [3]

Вибір маршруту передачі повідомлень здійснюється за допомогою одного з відомих методів (протоколів) маршрутизації. Для управління топологією (місцеположенням) ТАП краще використовувати таблично-орієнтовані протоколи, наприклад, OLSR, тоді кожен МСВ матиме власну маршрутну таблицю $П_i$ до усіх інших мережевих вузлів [3], [29, 30].

Для управління топологією (місцезаположенням) ТАП в мережі використовується центр управління (ЦУ), розташований за межами району дислокації МСВ r . Використовуючи окремий службовий канал, ЦУ через мережу ТАП може збирати вихідні дані про початкову топологію МБСМ із ТАП в деякий момент часу t : координати та швидкість переміщення МСВ $(x_i, y_i)_t, \vec{v}_i, i = \overline{1, N}$ та попередньо виведених ТАП $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}], \vec{V}_{0k}, k = \overline{1, K}$, дані про існуючі маршрути та їх якість P_i , та здійснює відповідне управлінське рішення (наприклад, вивід нової ТАП або переміщення ТАП, що була виведена раніше, в нове положення в просторі X_{0k}), при якому пропускна здатність мережі S досягає максимуму. При цьому вважається, що під час планування мережі ЦУ відомий розподіл трафіку (навантаження) γ_{ab} між кожною парою відправник-отримувач $a-b$, що задається матрицею тяжіння $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ [3].

Ціллю управління положенням ТАП є підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП із одночасним забезпеченням структурної зв'язності МСВ і якості маршрутів передачі повідомлень між ними. При цьому під *пропускною здатністю* будемо розуміти максимальне значення трафіку γ , яке МБСМ із ТАП може обробити в одиницю часу при незмінній матриці тяжіння Γ .

Зведені відомості про функціонування та ресурси МБСМ із ТАП представлено в таблиці вихідних даних (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Вихідні дані про функціонування та ресурси МБСМ із ТАП

ТАП	<p><i>Кількість на операцію: $K = 1 \dots 10$.</i></p> <p><i>Потужність передавача: $P_j = \text{const}, j = \overline{1, K}$.</i></p> <p><i>Висота баражування: $h_j \leq 3000$ м, $j = \overline{1, K}$.</i></p> <p><i>Час баражування: $T_{\sigma j} \leq 4$ год, $j = \overline{1, K}$.</i></p> <p><i>Швидкість переміщення: $V_{0j} = 60 \dots 400$ км/год, $j = \overline{1, K}$.</i></p>
-----	---

Продовження Таблиці 1.2

МСВ	<p>Кількість МСВ: $N < 500$.</p> <p>Потужність передавача: $p_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$.</p> <p>Координати МСВ: $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$.</p> <p>Розмір району дислокації МСВ: $r = 10000 \times 10000 \text{ м}^2$.</p> <p>Швидкість переміщення: $v_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$.</p>
Частотне розподілення	<p>Радіоканал МСВ-МСВ: напівдуплексний одно частотний (f_1).</p> <p>Радіоканал МСВ-ТАП-МСВ: дуплексний двох частотний (f_2-f_3)</p> <p>Радіоканал ТАП-ТАП: Дуплексний багато частотний.</p> <p>Діапазон частот: 2,4 ГГц.</p> <p>Ширина смуги каналу: $\Delta f_1 = \dots = \Delta f_5 = 20 \text{ МГц}$.</p>
МД	<p>Тип МД: випадковий</p> <p>Протоколи МД: МДСЗ (МСВ-МСВ), АПР (МСВ-ТАП-МСВ), FDMA (ТАП-ТАП).</p>
Марш-ція	<p>Алгоритм побудови маршрутів: Дейкстри.</p> <p>Тип протоколу: таблічно-орієнтовний (наприклад, OLSR);</p>
Трафік	<p>Тип: однорідний (напр., VoIP+дані).</p> <p>Матриця розподілу трафіку $\Gamma = \ \gamma_{ab}(t)\$</p> <p>Швидкість передачі в каналах: $V = 11 \text{ Мбіт/с}$.</p> <p>Довжина пакету: $L = 1024 \text{ біт}$.</p>
Упр-ня	<p>Тип: змішаний (централізовано-децентралізований)</p>
Допу-щення	<p>Потік надходження пакетів відповідає розподілу Пуассона.</p> <p>Буфери мають нескінченну довжину черги.</p>

Використовуючи вихідні дані, вказані вище, загальну постановку задачі сформулюємо наступним чином: визначити розміщення X групи ТАП для максимізації пропускної здатності МБСМ із ТАП S , тобто

$$S = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{m \ ab}(X) \rightarrow \max_{X \in \Omega} \quad (1.1)$$

де Ω – область допустимих значень (ОДЗ), яка визначається вимогами до зв'язності і до показників функціонування МБСМ із ТАП;

$$X = \begin{bmatrix} X_{01} \\ \dots \\ X_{0k} \end{bmatrix}, \text{ де } X_{01} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix}, \dots, X_{0k} = \begin{bmatrix} x_{0k} \\ y_{0k} \\ z_{0k} \end{bmatrix}, k = \overline{1, K}.$$

Схему розв'язання даної задачі із поділом часткових задач по розділах дисертаційної роботи показано на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 - Схема розв'язання поставленої наукової задачі

1.5 Висновки до розділу 1

1. Аналіз функціонування МБСМ на основі використання ТАП показав, що вони відносяться до класу динамічних, складних, багатofункціональних та багаторівневих систем, що мають при розробці проблеми, пов'язані з побудовою та підтримкою структури з заданої зв'язністю, якістю обслуговування МСВ, підвищенням пропускної здатності мережі. Функціонування МБСМ із ТАП потребує ефективної системи управління, частиною якої є підсистема управління топологією (місцеположенням) мережею ТАП.

2. Аналіз методів підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП показав, що існуючі на сьогодні методи, які закладаються в систему управління топологією (місцеположенням) ТАП, вирішують лише часткові задачі, що забезпечують геометричну зв'язність роз'єднаних компонентів МБСМ, не враховують обмеження на ємність каналних ресурсів, розподіл навантаження та обслуговування пакетів в вузлах МБСМ. Існуючі методи планування наземних БСМ також не ефективні, оскільки вони мають велику складність і час обчислення, що не дозволяє ТАП в режимі реального часу відпрацьовувати отримані рішення. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, та не враховують характер мобільності МСВ та маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню.

3. Розробка методу підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ є актуальною і має не тільки теоретичне, а й практичне значення для забезпечення ефективної роботи сучасних МБСМ.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Забезпечення зв'язної структури мережі є першою вимогою для підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП, тому в даному розділі дисертаційної роботи удосконалено математичну модель оцінки зв'язності мобільних сенсорних вузлів мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами. Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності, що визначає її новизну, полягає в тому, що вперше запропоновано поєднати аналітичні моделі оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах із аналітичними моделями прогнозування переміщення мобільних сенсорних вузлів [3].

2.1 Вихідні дані та обмеження

Для оцінки структурної зв'язності вузлів МБСМ із ТАП використаємо наступні вихідні дані та параметри: $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, N}$, $X_{0k}, k = \overline{1, K}$ – координати МСВ і ТАП, виведених к моменту часу t ; $h_{\max} = 3000$ м – максимальна висота баражування ТАП; $r_{\min} = 50$ м – мінімальний радіус баражування ТАП; $v_i = 2$ м/с – середня швидкість руху МСВ - пішохід; ; $v_i = 15$ м/с – середня швидкість руху МСВ – транспортний засіб; діапазон частот радіоканалів МСВ-МСВ (МСВ-ТАП) – 2,4 ГГц, радіоканалів ТАП-ТАП – 5 ГГц; ширина смуги кожного радіоканалу $\Delta f = 20$ МГц; модель радіоканалу МСВ-МСВ – Релея із незалежними завмираннями, усіх інших радіоканалів – із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ); потужність передавача однакова для всіх МСВ – $p_i = \text{const}$; потужність передавача ТАП однакова для всіх ТАП – $p_k = \text{const}$; потужність шуму на вході приймача однакова для

всіх вузлів $P_{ui} = P_{uk} = 10^{-10}$ Вт; швидкість передачі однакова для всіх каналів $V=11$ Мбіт/с; довжина пакету $L=1024$ біт. [1, 3]

Обмеження при оцінці зв'язності вузлів, що входять до складу маршрутів $M = \{m_{ab}\}$ МБСМ із ТАП, безпосередньо між собою, наступні:

$\Omega_1: \{d_{ij} \leq d^o, D_{ik} \leq D^o (R_{ik} \leq R^o), D_{kl} \leq D', T_{z\epsilon ij} \geq T_{z\epsilon}^0 \quad \forall ij \parallel ik \parallel kl \in m_{ab},$
 $i, j = \overline{1, N}, k, l = \overline{1, K}\}$, де d_{ij} – відстань між i -м та j -м МСВ, d^o – відповідне обмеження зверху, а D_{ik}, D^o – похила дальність між i -м МСВ та k -тою ТАП та відповідне обмеження зверху; R_{ik}, R^o – відстань між i -м МСВ та точкою проекції положення k -тої ТАП на земній поверхні та відповідно максимальний радіус стабільного покриття (стільника), утворюваного k -тою ТАП; D_{kl}, D' – дальність між k -тою та l -тою ТАП; $T_{z\epsilon ij}, T_{z\epsilon}^0$ – тривалість зв'язності між сусідніми вузлами та відповідне обмеження. [1, 3]

$T_{z\epsilon ij}^0$ представляє собою мінімальний час протягом якого ТАП відпрацьовує задане розміщення, будує маршрути та здійснює передачу мінімальної кількості повідомлень. Визначимо його наступним чином:

$$T_{z\epsilon}^0 = T_{зб.інф.} + T_{пош.ріш.}^{\min} + T_{відпр.}^{\max} + T_{експл.} \quad (2.1)$$

де $T_{зб.інф.}$ – час отримання вихідної інформації $((x_i, y_i)_t, v_i, P_i)$; $T_{пош.ріш.}^{\min}$ – час пошуку рішення (розміщення ТАП), що має мінімальне відхилення від максимального значення пропускної здатності; $T_{відпр.}^{\max}$ – максимальне значення часу відпрацювання ТАП заданого рішення (визначається розмірами району дислокації МСВ та максимальною швидкістю переміщення ТАП); $T_{експл.}$ – мінімальний значення часу роботи маршруту передачі повідомлень в період його відносної стабільності. [1, 3]

2.2 Методика оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП

Для оцінки наявності та тривалості структурної зв'язності вузлів МБСМ із ТАП, а також можливості застосування обраного методу (системи) управління положенням ТАП запропоновано наступну методику оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП [3]:

Крок 1. Прогнозування значення середньої тривалості зв'язності $T_{зв\ ij}$ між вузлами МБСМ із ТАП з використанням моделей переміщення МСВ, що розглядаються далі [3].

Крок 2. Перевірка здатності відпрацювання ТАП при заданій динаміці топології мережі (тривалості зв'язності) заданої цілі управління, що визначається умовою $T_{зв\ ij} > T_{зв\ ij}^0$. При виконанні умови підвищення пропускної здатності мережі шляхом зміни положення ТАП можливе, також існує можливість збільшення множини можливих рішень ($T_{нов.ріш.}$) з метою досягнення більшої точності, в іншому випадку застосування методу не можливе [3].

Крок 3. Розрахунок дальності зв'язку від кожного МСВ до найближчого сусіда та центру зони покриття ТАП. [3]

Крок 4. Перевірка для кожного МСВ умов Ω_1 та перевірка цілісності мережі. Мережа вважається цілісною при наявності хоча б одної компоненти зв'язності графу мережі. Перевірку цілісності МБСМ із ТАП можливо здійснити шляхом побудови мінімального кістякового дерева (МКД) графу, за допомогою, наприклад, алгоритму Пріма [72] та перевірки на виконання умов Ω_1 кожного ребра дерева. Якщо умови Ω_1 виконуються, то МБСМ із ТАП структурно зв'язана на момент часу t , в іншому випадку – необхідне певне управлінське рішення (наприклад, вивід або переміщення ТАП) [3]

Для реалізації методики оцінки зв'язності вузлів МБСМ із ТАП розроблені наступні математичні моделі [1, 3].

2.3 Математична модель оцінки максимальної дальності радіозв'язку в МБСМ із ТАП

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку пари МСВ МБСМ із ТАП обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії, при якій відношення сигнал-шум в точці прийому має значення не менше визначеного та забезпечує задану ймовірність пакетної помилки (PER) для заданого виду сигнально-кової конструкції (СКК).

По-друге, максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку залежить від ефективності методу множинного доступу (МД) до загального каналного ресурсу. При збільшенні довжини радіолінії при організації МД зростає кількість колізій, зменшується пропускна здатність і зростає затримка передачі повідомлень. Тому максимальну дальність зв'язку можна визначити граничним значенням пропускної здатності (ПЗ) каналу s^0 при заданих розмірі пакету даних L , інтенсивності трафіку G та швидкості передачі V .

Спочатку отримаємо аналітичну модель ймовірності пакетної помилки (PER) для каналів МБСМ із ТАП.

Оскільки для передачі пакету довжини L використовується модуляція BPSK, то модель сигналу, що приймається, буде мати наступний вигляд [1], [73]:

$$y_i = \rho_i x_i + n_i, i = 1, \dots, L \quad (2.2)$$

де $x_i, i = 1, \dots, L$ - послідовність BPSK, що передана ($x_i = 1, -1$);

ρ_i - незалежні випадкові амплітуди каналу, що мають релеевський розподіл;

n_i - гаусів адитивний білий шум із нульовим середнім значенням та дисперсією σ_n^2 [1].

Якщо хоча б один біт пакету було змінено у процесі декодування, то будемо вважати, що закодований пакет був переданий з помилкою.

Використовуючи таке визначення, представимо вираз для ймовірності пакетної помилки наступним чином [1]:

$$P_L = 1 - (1 - P_e)^L \quad (2.3)$$

де P_e - ймовірність помилки в одиницю часу;

L - довжина інформаційної послідовності.

Для теоретичної оцінки ймовірності P_e використаємо наступний вираз [1], [74]:

$$P_e \leq \sum_{d=d_f}^{\infty} a_d P(d) \quad (2.4)$$

де $P(d)$ - ймовірність вибору помилкової послідовності зі значенням ваги d ;

d_f - вільна відстань коду;

a_d - дистанційний спектр досліджуваного коду.

На практиці при обчисленнях за формулою (2.4) застосовується кінцева кількість доданків. Для різних кодів розраховані дистанційні спектри і для них складені таблиці [1], [75].

Для оцінки ймовірності помилки в одиницю часу знайдемо ймовірність вибору помилкової послідовності зі значенням ваги d . Для ймовірності $P(d)$ вираз має наступний вигляд [1]:

$$P(d) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} Q\left(\sqrt{\frac{R_c \sum_{i=1}^N \rho_i^2}{\sigma_n^2}}\right) \frac{\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \dots \cdot \rho_N}{\sigma^2} e^{-\frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}{2\sigma^2}} d\rho_1 \dots d\rho_N \quad (2.5)$$

де $\sigma^2 = \langle |\rho_i|^2 \rangle / 2$, R_c - швидкість коду.

Обчислення даного інтеграла здійснюється шляхом апроксимації Q -функції. У літературі, що присвячена аналізу завадостійкості згорточних кодів, застосовується апроксимація, яка побудована на основі границі Чернова, що для релеєвського каналу з незалежними завмиранням дає оцінку, яка відрізняється від експериментального результату на 0.8 дБ [1]

В роботі [76] було використано уточнену апроксимацію, аналітичний вираз якої має наступний вигляд для ймовірності вибору помилкової послідовності зі значенням ваги d :

$$P(d) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Gamma(d-1/2)}{\Gamma(d)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2 \cdot R_c \cdot SNR}} \cdot \left(\frac{1}{1 + 2 \cdot R \cdot SNR} \right)^{d-1/2} \quad (2.6)$$

де SNR – відношення сигнал/шум, $\Gamma(d)$ – гама-функція [1].

Згідно [55] вираз SNR на вході приймача j -ого вузла матиме наступний вигляд:

$$SNR_{ij} = \frac{P_i G_{ij}}{\sigma_j^2}, i \neq j, i, j = \overline{1, N} \quad (2.7)$$

де P_i - потужність передавача i -го вузла (однакова для кожного вузла БСМ із МС та ТАП);

$G_{ij}, i \neq j$ - відгук безпроводового каналу між вузлами i та j ;

σ_j^2 - дисперсія шуму приймача j -го вузла (однакова для кожного вузла БСМ із МС та ТАП);

N – кількість наземних вузлів (МА) в мережі.

Використовуючи релеєвську модель, посилення каналу можна виразити наступним чином [77]:

$$G_{ij} = \frac{C_{ij} |h_{ij}|^2}{(D_{ij})^\alpha} \quad (2.8)$$

де C_{ij} - константа, що враховує посилення антен та будь-які перешкоди поширення (затемнення);

h_{ij} - параметр, що враховує згасання (у т.ч. через багатопроменеве завмирання сигналу);

D_{ij} - відстань між вузлами i та j ;

$\alpha = 2...4$ - коефіцієнт діелектричних втрат поширення.

Якщо відомі координати МСВ (наприклад, через GPS), тоді відстань між МСВ i та j можна виразити наступною формулою:

$$D_{ij} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2} \quad (2.9)$$

Підставляючи (2.9) в (2.8), (2.8) в (2.7), (2.7) в (2.6), (2.6) в (2.4) та (2.4) в (2.3) отримаємо вираз ймовірності пакетної помилки між наземними МСВ i та j :

$$P_{L_{ij}} = 1 - \left(1 - \sum_{d=d_f}^{\infty} \left(\frac{a_d \cdot \Gamma(d-1/2) \cdot \sigma_j^2 (|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2)^{d/4}}{2 \cdot \Gamma(d) |h_{ij}| \sqrt{2 \cdot R_c \cdot P_i C_{ij}}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\sigma_j^2 (|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2)^{d/2}}{2 \cdot R_c \cdot P_i C_{ij} |h_{ij}|^2 + \sigma_j^2 (|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2)^{d/2}} \right)^{d-1/2} \right)^L, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N} \quad (2.10)$$

В даному випадку вважатимемо, що наземні МСВ мають ненаправлені антени, а отже посилення антен каналу МСВ-МСВ постійне та дорівнює $C_{ij} = C_1$.

Якщо координати проєкцій ТАП-вузлів на земній поверхні x_{0k}, y_{0k} відомі (наприклад, через GPS), тоді відстань між ТАП та наземними МСВ можна виразити наступним чином:

$$D_{ik} = \sqrt{h^2 + (|x_{0k} - x_i|^2 + |y_{0k} - y_i|^2)}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K} \quad (2.11)$$

де h – висота розташування ТАП над земною поверхнею, м;

K – кількість ТАП у мережі.

В даній роботі будемо вважати, що посилення антен каналу ТАП-МСВ (МСВ-ТАП) буде постійним у будь-якому напрямку випромінювання ТАП сигналу на землю та дорівнюватиме $C_{0i}^k = C_0, k = \overline{1, K}$.

Тоді вираз (2.10) для каналу ТАП-МСВ (МСВ-ТАП) прийме наступний вигляд:

$$P_{L 0i(i0)}^k = 1 - (1 - \sum_{d=d_f}^{\infty} (\frac{a_d \cdot \Gamma(d-1/2) \cdot \sigma_i^2 (H^2 + (|x_0^k - x_i|^2 + |y_0^k - y_i|^2)^{\alpha/4}}{2 \cdot \Gamma(d) |h_{0i}| \sqrt{2 \cdot R_c \cdot P_{0(i)} C_0}} \times \\ \times \left(\frac{\sigma_i^2 (H^2 + (|x_0^k - x_i|^2 + |y_0^k - y_i|^2)^{\alpha/2}}{2 \cdot R_c \cdot P_{0(i)} C_0 |h_{0i}|^2 + \sigma_i^2 (H^2 + (|x_0^k - x_i|^2 + |y_0^k - y_i|^2)^{\alpha/2}} \right)^{d-1/2}))^L, \quad (2.12) \\ i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$$

У випадку каналу ТАП-ТАП (в каналі з АБГШ, м'якому декодуванні Вітербі при когерентній модуляції BPSK) ймовірність вибору помилкової послідовності зі значенням ваги d має наступний вигляд [1], [74]:

$$P(d) = Q(\sqrt{2 \cdot SNR_b R_c d}) \quad (2.13)$$

де SNR_b - відношення сигнал/шум на біт сигналу, що приймається;

$Q(x)$ - гаусів інтеграл помилок.

Враховуючи, що $SNR_b = SNR \frac{C}{W}$, де C – швидкість передачі, W – ширина частотної смуги сигналу, а також підставивши вираз (2.13) в (2.4) та (2.4) в (2.3), можемо отримати вираз загальний вираз ймовірності пакетної помилки між ТАП-вузлами n та m :

$$P_{L\ nm} = 1 - \left(1 - \sum_{d=d_f}^{\infty} a_d Q\left(\sqrt{2 \cdot \frac{P_n C_{nm} F_{nm}}{\sigma_m^2 (\sqrt{|x_0^n - x_0^m|^2 + |y_0^n - y_0^m|^2})^\alpha} \cdot \frac{C}{W} \cdot R_c \cdot d}\right)\right)^L, \quad (2.14)$$

$$n \neq m, n, m = \overline{1, K}$$

де F_{nm} - множник послаблення радіолінії між ТАП n та m .

Використовуючи модуляцію BPSK і загортковий код типу 1338₈,1718₈ зі швидкістю 1/2, були отримані залежності коефіцієнту пакетних помилок PER від максимальної дальності зв'язку для каналів МСВ-МСВ та каналів МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) при різних значеннях потужності передавача, що зображено на рис. 2.1 та рис. 2.2. [3]

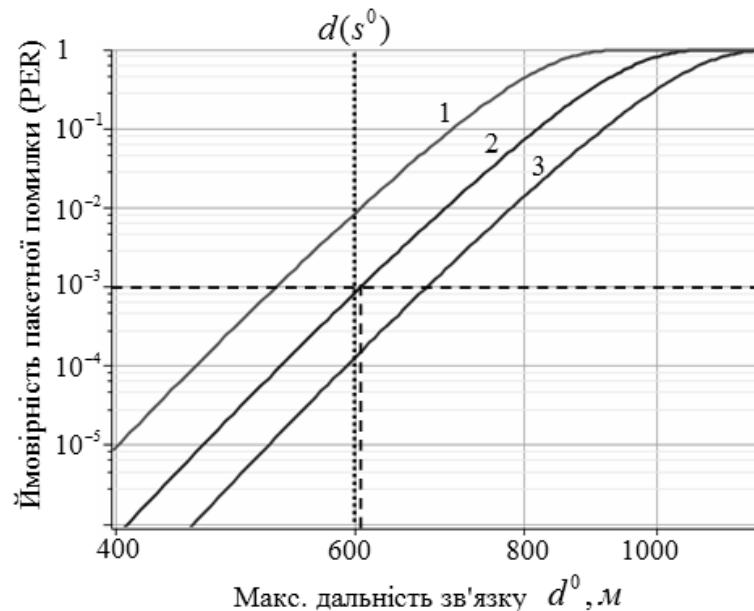


Рисунок 2.1 – Залежність PER від максимальної дальності зв'язку МСВ-МСВ для каналу з розподілом Релея із завмираннями при різних значеннях потужності передачі повідомлень: 1 – 0,6 Вт; 2 - 0,8 Вт; 3 – 1 Вт [1]

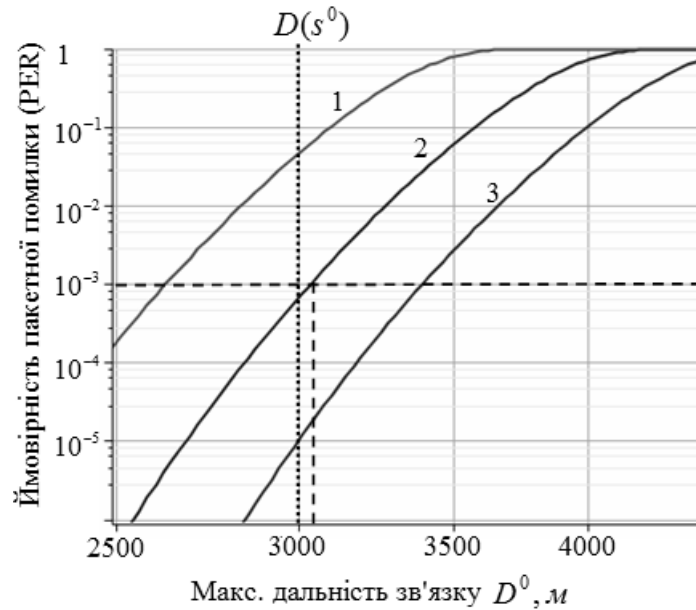


Рисунок 2.2 – Залежність PER від максимальної дальності зв'язку МС-ТАП (ТАП-ТАП) для каналу АБГШ при різних значеннях потужності передачі повідомлень: 1 – 6 Вт; 2 – 8 Вт; 3 – 10 Вт [1]

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку визначається ефективністю методу множинного доступу (МД) до загального каналного ресурсу. При $s^0=0,5$ максимальна довжина радіолінії МСВ-МСВ d^o має бути не більше 600м для методу МДСЗ, МСВ-ТАП D^o – не більше 3000м для методу МД АПР з резервуванням n пакетів. На довжину радіолінії ТАП-ТАП обмежень не має (окрім енергетики), оскільки метод МД, що використовується на ній, не залежить від нормованого часу поширення пакету [3].

Тому, для забезпечення заданих вимог до характеристик методів МД, потужність передавача слід обирати так, щоб забезпечити заданий коефіцієнт пакетної помилки PER на відстані, яка визначається максимальним часом поширення пакету в мережі. Наприклад, для забезпечення на відстані 600м значення PER 10^{-3} потужність передавача МСВ має становити близько 0,8Вт. Для забезпечення того ж значення PER на відстані 3000м потужність передавача ТАП має бути близько 8Вт [3].

Знаючи максимальну довжину радіолінії МСВ-ТАП, можна визначити максимальний радіус стільника, що створює ТАП. У фіксованому положенні ТАП у просторі максимальний радіус стільника визначатиме кут місця МСВ ψ і висота баражування ТАП h . Згідно рекомендації F.1569 для мереж на основі NARs мінімальний кут місця становить 20^0 , а на практиці у межах щільно забудованого міста становить 60^0 - 90^0 для забезпечення прямої видимості між МС та ТАП. Тоді із тригонометричних розрахунків випливає, що радіус стільника становитиме $R \leq 1500$ м при висоті ТАП $2600 \leq h < 3000$ м. Але враховуючи маневрування ТАП по колу з мінімальним радіусом та неточність його виводу [2], радіус зони стабільного радіопокриття становитиме $R^o \leq 1450$ м [3].

2.4 Розрахунок тривалості зв'язності мобільних сенсорів у МБСМ із ТАП

Мобільність МСВ призводить до того, що вони не можуть знаходитись постійно у зоні радіовидимості один одного та зоні покриття ТАП. Тобто, виникає необхідність моделювання часу існування («життя») з'єднання *LLT* (*Link life time*), на протязі якого МСВ і ТАП можуть здійснювати інформаційний обмін. Це питання розглядається в роботах [78 –80], де для аналізу та моделювання запропоновано низку моделей мобільності вузлів. Однак моделі, що були запропоновані, охоплюють лише вузький набір варіантів переміщення МСВ, а отже підлягають доповненню і вдосконаленню.

МБСМ із ТАП передбачають довільне (за напрямком та швидкістю) переміщення МСВ. На практиці, коли йде мова про мобільний зв'язок «пішохід-пішохід», то у місті напрямок руху пішоходу змінюється у відповідності із планом забудови міста (частіше всього це повороти на 90^0), швидкість при цьому не перевищує 2 м/с; транспортні засоби з урахуванням

обмежень на швидкість переміщуються у місті з граничною швидкістю до 16 м/с.

2.4.1 Розрахунок тривалості зв'язності між МСВ у випадку прямої радіо видимості

Розглянемо переміщення МСВ B відносно МСВ A , розташованого від нього на відстані d , під кутом φ зі швидкістю v (рис. 2.3а). Будемо вважати, що тривалість зв'язності ($T_{зв}$) між МСВ – це проміжок часу, за який МСВ B опиняється в точці B' , що обмежена радіусом зони радіо видимості R [65]. Тоді за допомогою апарату тригонометрії отримаємо наступне значення тривалості зв'язності:

$$t = \frac{d \cos \varphi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \varphi}}{v}.$$

Для вихідних даних $d = 100\text{м}$, $v_1 = 2\text{м/с}$, $v_2 = 15\text{м/с}$ та $\varphi = 90^\circ$ отримаємо результати розрахунку тривалості зв'язності, що приведені на рис. 2.3б. Аналіз результатів розрахунку показує, що тривалість зв'язку МСВ-МСВ може становити не більше 2-3 хв. для пішоходів та не більше 0,5 хв. для транспортних засобів (при $R = 500\text{ м}$), а у випадку ТАП-МСВ - до 20-25 хв. для пішоходів та до 6-7хв. для транспортних засобів (при $R = 2500\text{ м}$). Отже ефективність застосування ТАП очевидна. Тому завдяки управлінню положенням ТАП у просторі можна досягти більших значень тривалості зв'язності МСВ.

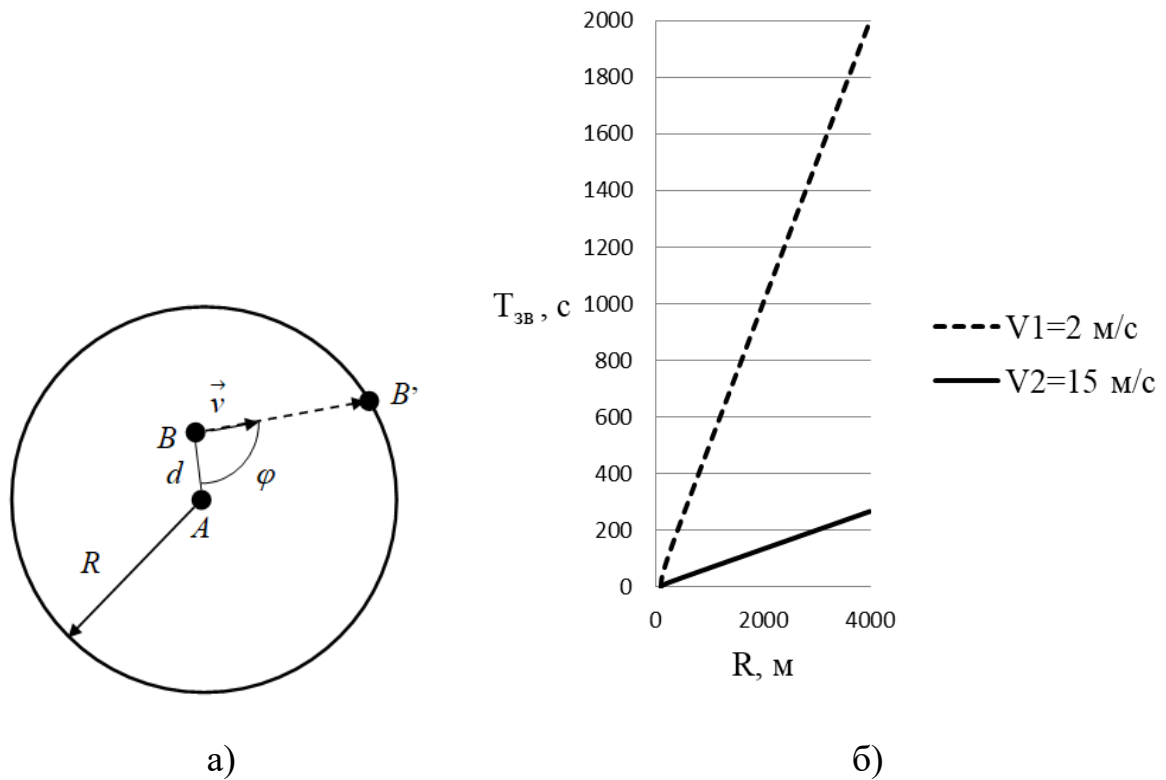


Рисунок 2.3 - Модель (а) і результати розрахунків тривалості зв'язності (б)

2.4.2 Розрахунок тривалості зв'язності у випадку ретрансляції через проміжний МСВ (ТАП)

Розглянемо модель, в якій МСВ A може здійснювати зв'язок з МСВ C тільки за рахунок ретрансляції радіосигналу через МСВ B . МСВ C розташовується поза межами зони радіовидимості МСВ A , при цьому МСВ C знаходиться в зоні радіовидимості МСВ B . Для спрощення будемо вважати, що радіус зони радіовидимості R для всіх МСВ однаковий.

Для передачі повідомлень МСВ A буде за деякий час τ маршрут до МСВ C . Оскільки МСВ B і C рухаються один відносно одного (і відносно МСВ A) зі швидкостями відповідно v та w (рис. 2.4а), та, наприклад, розходяться, то можливе, що за час t встановлення маршруту від МСВ A до МСВ C ретранслятор B та кінцевий МСВ C розійдуться настільки, що

передача повідомлень від МСВ A до МСВ C стане неможливою. Розрахуємо цей час.

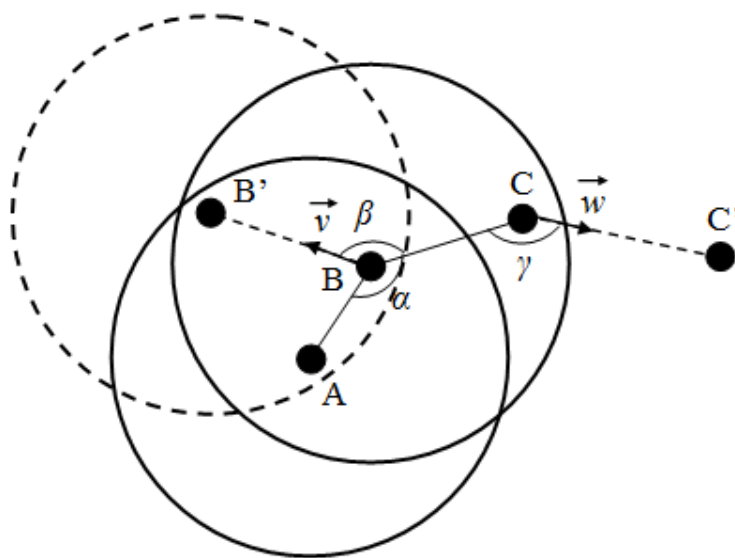
Нехай тривалість зв'язності t – це проміжок часу, поки МСВ C не опиниться за межами зони видимості ретранслятора в точці C' . Тоді з використанням формул [81] отримаємо:

$$t = \frac{\sqrt{AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cdot \cos(\alpha + \beta + \gamma)}}{v^*},$$

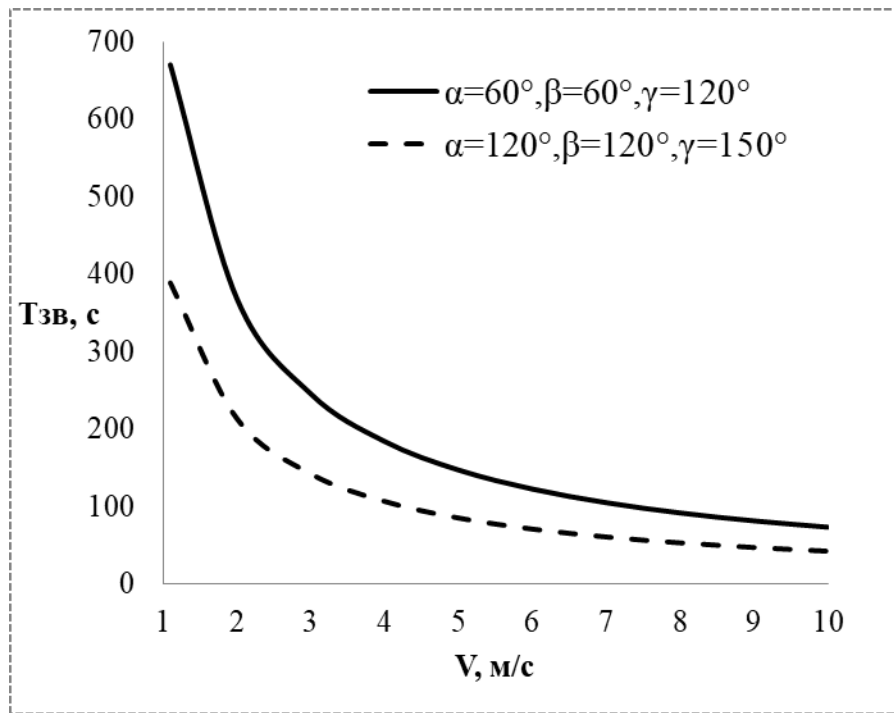
де v^* – відносна швидкість МСВ B та C , величина якої визначається величинами та напрямками векторів \vec{v} та \vec{w} .

Задаючи відстані між МСВ $AB=200\text{м}$, $AC=600\text{м}$, отримаємо графік залежності тривалості зв'язності між МСВ з однією ретрансляцією від відносної швидкості МСВ для різних значень кутів між МСВ (рис. 2.46).

Аналіз рис. 2.4 показує, що значення тривалості зв'язності з однією ретрансляцією знаходяться у тих самих межах, що й у випадку без ретрансляції, та визначаються розміщенням МСВ та напрямком й величиною швидкості їх переміщення.



a)



б)

Рисунок 2.4 - Модель (а) та графік залежності тривалості зв'язності з однією ретрансляцією (б)

Далі розглянемо поведінку фрагменту МБСМ із ТАП (БПЛА) з 4-х вузлів. У початковому стані МСВ B , C і D знаходяться у межах зони радіовидимості МСВ A (рис. 2.5а) і МСВ A може з ними здійснювати обмін повідомленнями. Але через мобільність, що показана векторами руху МСВ B , C і D відносно МСВ A топологія МБСМ змінюється, через деякий час МСВ B виходить з зони видимості МСВ A . Зв'язок між МСВ A і B на деякий час переривається (рис. 2.5б). Це продовжується до тих пір, поки МСВ B не потрапляє в зону радіо видимості МСВ C , який, у свою чергу, буде виконувати функцію ретранслятору для МСВ A . Зауважимо, що протягом даного періоду часу МСВ можуть змінювати напрям та швидкість переміщення. Тепер зв'язок між МСВ A і B здійснюється через МСВ-ретранслятор C у два стрибки (рис. 2.5в). При цьому можлива ситуація, коли МСВ C не може більше служити ретранслятором (наприклад, через розряд батареї) (рис. 2.5г). В цьому випадку протокол (метод) маршрутизації

адаптується до нових умов і створює інший маршрут – через ТАП-ретранслятор (рис. 2.5д). Тобто ми можемо говорити про можливість зв'язку між МСВ A та B через ТАП.

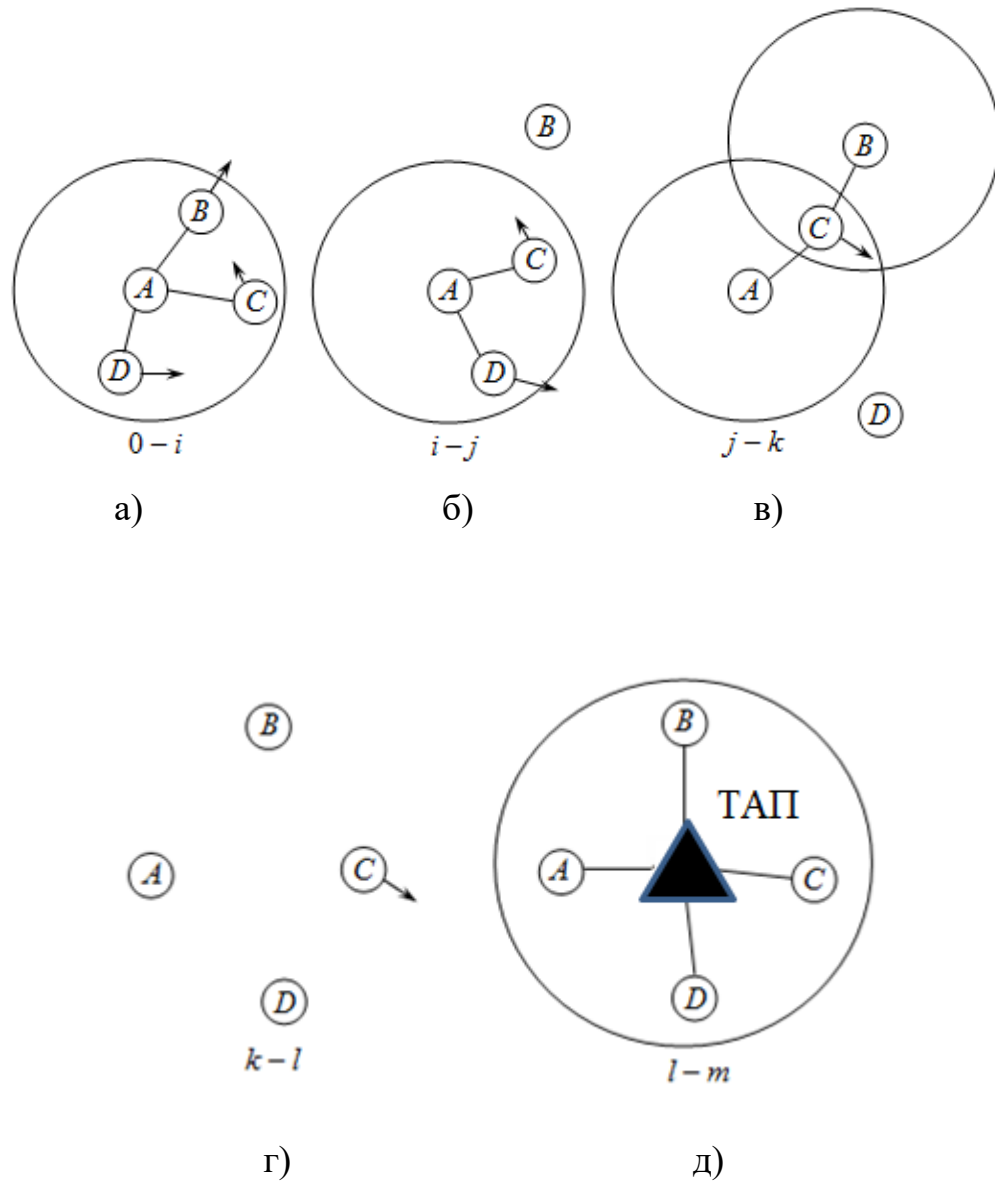


Рисунок 2.5 - Забезпечення зв'язності при переміщенні МСВ

Якщо вказану вище послідовність подій відобразити на схемі (рис.2.6), то ми побачимо порушення зв'язності між МСВ A та B на проміжках часу $i-j$ та $k-l$.

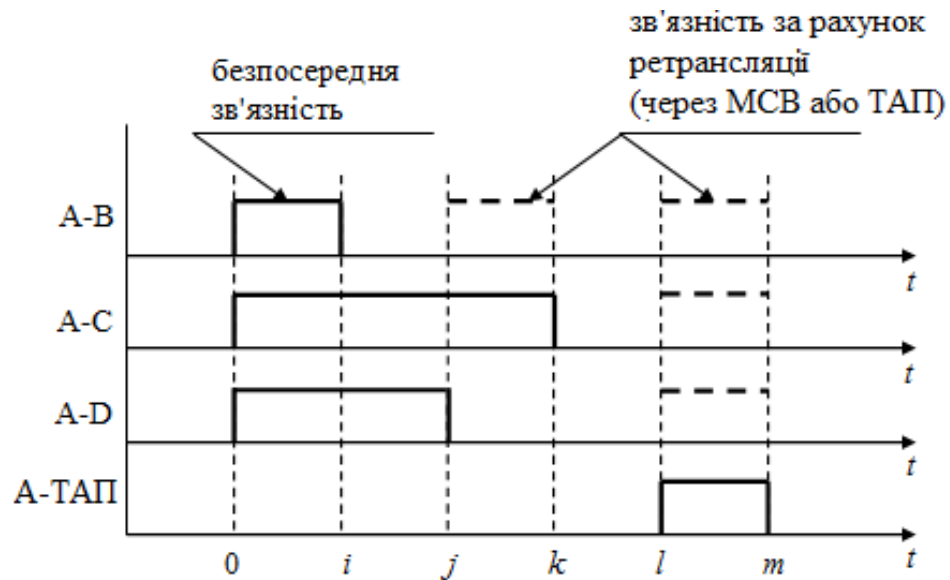


Рисунок 2.6 - Інтервали зв'язності

У випадку передачі повідомлень великого розміру це може призвести, якщо не вживати спеціальних заходів, до втрати інформації. Такими заходами можуть бути:

1. Поділ повідомлень на пакети та їх відправка тільки після підтвердження наявності зв'язності між МСВ МБСМ із ТАП та прогнозу щодо її підтримки протягом часу пересилки одного пакету. Для забезпечення пересилки у вузла-відправника необхідно передбачити можливість збільшення зони радіо покриття шляхом збільшення потужності передавача або зміною діаграми спрямованості антени [82].

2. Наявність «резервних маршрутів», які автоматично включаються при втраті основного маршруту.

3. Застосування алгоритмів локального відновлення маршруту шляхом розрахунку координат МСВ в локальних координатах, як, наприклад, у [65].

4. Застосування мережі ТАП в якості повітряних вузлів-ретрансляторів (буде розглянуто у 4-му розділі).

2.4.3 Моделювання переміщення вузлів мережі

За допомогою математичної моделі, що було розглянуто у підрозділі 2.4.1, змодельуємо переміщення МСВ за різними сценаріями і порівняємо тривалість зв'язності між вузлами МБСМ із ТАП при різних сценаріях мобільності. Для моделювання переміщення МСВ пропонуються наступні сценарії мобільності:

1. «однакові напрямки» або «марш» ($\varphi = const, v = const$). В цьому сценарії усі МСВ в межах зони прямої радіо видимості R рухаються один відносно одного прямолінійно та паралельно в однаковому напрямку та з однаковою швидкістю, як показано на рис. 2.7а.

2. «випадкові напрямки» ($\varphi = const, v = const$). В цьому сценарії усі МСВ в межах зони прямої радіо видимості R рухаються прямолінійно з однаковою швидкістю, але за різними випадковими напрямками, як показано на рис. 2.7б.

3. «випадкового блукання в полі» ($\varphi = var, L = const, v = const$). В цьому сценарії усі МСВ в межах зони прямої радіо видимості R рухаються по ламаній траєкторії з однаковою швидкістю, випадково змінюючи свій напрямок з постійним кроком $l \ll R$, як показано на рис. 2.7в.

4. «випадкового блукання в місті» ($\varphi = var(0^0, 90^0, 180^0, 270^0), L = const, v = const$). В цьому сценарії усі МСВ в межах зони прямої радіо видимості R рухаються по перпендикулярних прямих (тобто вулицях) з однаковою швидкістю та випадковим чином на кожному перехресті змінюють свій напрямок руху з постійним кроком $l \ll R$, як показано на рис. 2.7г.

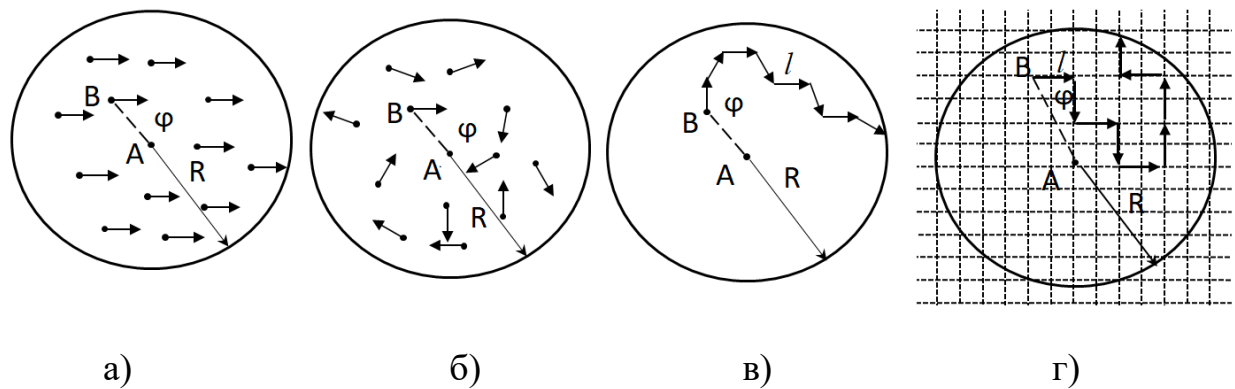
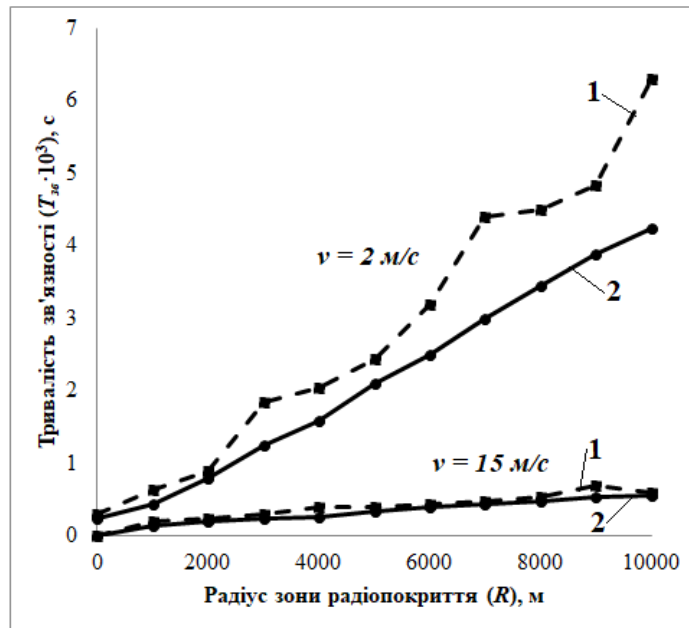


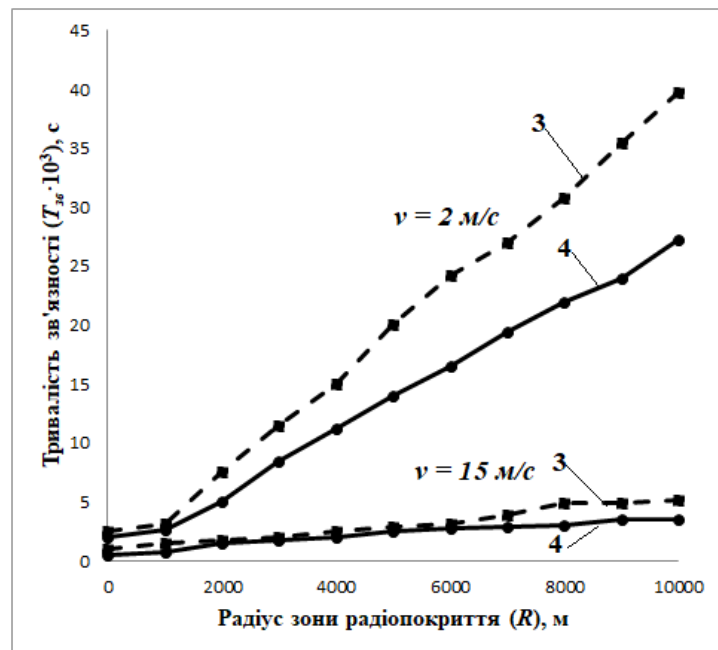
Рисунок 2.7 - Траєкторії руху вузлів МБСМ із ТАП в залежності від сценарію мобільності: а – сценарій «марш», б – сценарій «випадкові напрямки», в – сценарій «випадкове блукання в полі», г - сценарій «випадкове блукання в місті»

Координати усіх МСВ задаються випадково у межах зони прямої радіо видимості R заданого фіксованого МСВ (наприклад, ТАП). Кількість МСВ в зоні радіо покриття для кожного радіусу пропорційна її площі, тобто R^2 . Для різних швидкостей та сценаріїв переміщення МСВ розрахуємо значення середнього часу, за який МСВ досягне межі зони радіо покриття в залежності від її радіусу. Моделювання виконувалось за допомогою програмного середовища MAPLE. Результати моделювання приведені на рис. 2.8 а,б.

Аналіз рис. 2.8 а,б, показує, що тривалість зв'язності між МСВ t прямо пропорційна розміру зони радіо покриття R та обернено пропорційна швидкості переміщення МСВ (v). На тривалість зв'язності також впливає сценарій мобільності МСВ. При однакових значеннях R та v найбільші значення тривалості зв'язності спостерігаються в сценарії «випадкового блукання в полі» (крива 3), другі за значенням – в сценарії «випадкового блукання у місті» (крива 4), треті за значенням – в сценарії «марш» (крива 1), найменші – в сценарії «випадкові напрямки» (крива 2).



а)



б)

Рисунок 2.8 - Залежність середнього часу досягнення МСВ границі зони радіо покриття від її радіусу при різних сценаріях та швидкостях переміщення: 1 – сценарій «марш» (а), 2 – сценарій «випадкові напрямки» (а), 3 – сценарій «випадкове блукання в полі» (б), 4 - сценарій «випадкове блукання у місті»

[1]

Так у випадку ТАП (при $R=5000\text{м}$) середня тривалість зв'язку із пішоходами (для $v=2\text{м/с}$) буде мати значення відповідно – 20000, 14000, 2463, 2130 секунд, із транспортними засобами (при $v=15\text{м/с}$) відповідно – 2685, 1900, 326, 285 секунд. За допомогою цих дані можна визначити частоту відпрацювання нового положення ТАП, що використовується в методі підвищення пропускної здатності на основі управління положенням ТАП, що розглядається в Розділі 4.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Показано, що максимальна дальність прямого радіозв'язку пари МСВ МБСМ із ТАП обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії, при якій відношення сигнал-шум в точці прийому має значення не менше визначеного та забезпечує задану ймовірність пакетної помилки (PER) для заданого виду сигнально-кової конструкції (СКК). По-друге, вона визначається ефективністю методу множинного доступу (МД) до загального каналного ресурсу. При збільшенні довжини радіолінії при організації МД зростає кількість колізій, зменшується пропускна здатність і зростає затримка передачі повідомлень. Тому максимальну дальність зв'язку можна визначити граничним значення пропускної здатності (ПЗ) каналу s^0 при заданих розмірі пакету даних L , інтенсивності трафіку G та швидкості передачі V . При $s^0=0,5$ максимальна довжина радіолінії МСВ-МСВ d^0 має бути не більше 600м для методу МДСЗ, МСВ-ТАП D^0 – не більше 3000м для МД АПР із резервуванням n пакетів, а на довжину радіолінії ТАП-ТАП обмежень не має (окрім енергетики), оскільки метод МД, що використовується на ній, не залежить від нормованого часу поширення пакету [3].

2. Показано, що знаючи максимальну довжину радіолінії МСВ-ТАП, можна визначити максимальний радіус стільника, що створює ТАП. У фіксованому положенні ТАП у просторі максимальний радіус стільника

визначатиме кут місця МСВ ψ і висота баражування ТАП h . Згідно рекомендації F.1569 для мереж на основі NARs мінімальний кут місця становить 20^0 , а на практиці у межах щільно забудованого міста становить 60^0 - 90^0 для забезпечення прямої видимості між МС та ТАП. Тоді із тригонометричних розрахунків випливає, що радіус стільника становитиме $R \leq 1500$ м при висоті ТАП $2600 \leq h < 3000$ м. Але враховуючи маневрування ТАП по колу з мінімальним радіусом і неточність його виводу [2], радіус зони стабільного радіопокриття становитиме $R^o \leq 1450$ м [3].

3. На основі запропонованих простих моделей досліджено тривалість зв'язності МСВ МБСМ із ТАП у випадку прямої радіо видимості та з використанням ретрансляції. Показано, що тривалість зв'язності МСВ прямо пропорційна розміру зони радіо покриття та обернено пропорційна швидкості переміщення МСВ. На тривалість зв'язності також впливає сценарій мобільності МСВ. Моделювання переміщення МСВ було виконано за 4-ма сценаріями: «марш», «випадкові напрямки», «випадкове блукання в полі» і «випадкове блукання в місті». Найбільша тривалість зв'язності відповідають постерігається в третьому сценарії, а найменша – в другому (при фіксованому радіусі зони радіо покриття та швидкості переміщення МСВ). Середня тривалість зв'язності з'єднання ТАП-МСВ (пішохід) у випадку «випадкових напрямків» має значення до 36 хвилин, а з'єднання ТАП-МСВ (транспортний засіб) до 5 хвилин. Отримані результати використовується далі в методі підвищення пропускнуої здатності на основі управління положенням ТАП, що розглядається в Розділі 4.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Задача підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП одночасно вирішується із задачею забезпечення вимог до показників якості маршрутів передачі повідомлень. В даному розділі досліджено аналітичні моделі розрахунку трафіку, аналітичні моделі оцінки пропускної здатності та аналітичні моделі оцінки середньої затримки передачі в маршрутах МБСМ із ТАП [1, 3].

3.1 Вихідні дані, обмеження та допущення

Для оцінки якості маршрутів передачі повідомлень в МБСМ із ТАП використаємо наступні вихідні дані [1, 3]: $L=1024$ біт – довжина пакету даних; $V=11$ Мбіт/с – швидкість передачі даних; $\Pi = \|l(m_{ab})\|$, $a, b = \overline{1, N}$ – таблиця маршрутизації, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій в маршруті; $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння, γ_{ab} – середня інтенсивність потоку пакетів, що надходить до маршруту m_{ab} між відправником-одержувачем a - b ; $t_3^o = 400$ мс – максимально допустиме значення затримки передачі повідомлень в маршруті m_{ab} (відповідно до вимог стандарту ITU Y.1541); $s^o = 5,5$ Мбіт/с – мінімально допустиме значення пропускної здатності маршруту m_{ab} . Позначимо повний трафік користувача через γ , тобто

$$\gamma = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}.$$

При оцінці якості маршрутів в МБСМ введемо наступні обмеження [1, 3]:

$$\Omega_2: \{ s(m_{ab}) \geq s^o, t_3(m_{ab}) \leq t_3^o, a, b = \overline{1, N} \}.$$

Також були зроблені наступні допущення [1, 3]:

- 1) трафік, що передається в МБСМ, - однорідний (без пріоритетів);
- 2) потік пакетів, що обслуговується в вузлах мережі, відповідає пуасонівському розподіленню, тобто $A(\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau)$, де λ – інтенсивність пакетів, що надходять на обслуговування.
- 3) Розподіл часу обслуговування $B(t)$ може бути довільним і залежить від двох наступних параметрів: інтенсивності обслуговування пакетів μ та дисперсії D .
- 4) дисципліна обслуговування пакетів в буфері – «перший прийшов – перший обслуговується»;
- 5) вважається, що виконується умова не зростання черги $1/\mu < 1/\lambda$;
- 6) спосіб обслуговування пакетів у вузлах МБСМ із ТАП – з очікуванням без обмеження довжини черги.

3.2 Методика оцінки показників функціонування МБСМ із ТАП

Для визначення ефективності запропонованих заходів розроблено методику оцінки показників функціонування МБСМ із ТАП, що дозволяє оцінити відповідність маршрутів передачі повідомлень $M = \{m_{ab}\}, a, b = \overline{1, N}$ вимогам до параметрів функціонування мережі Ω_2 [3].

Методика вирішення даної задачі складається з наступних кроків:

Крок 1. Розрахунок за допомогою математичних моделей, що розглядаються далі в підрозділі 3.3, інтенсивності трафіку в радіоканалах для кожного маршруту m_{ab} [3],

Крок 2. Розрахунок за допомогою аналітичних моделей, що розглядаються далі в підрозділі 3.4, відповідно до матриць Γ та Π , значень пропускну здатності та середньої затримки передачі повідомлень в кожному маршруті m_{ab} [3].

Крок 3. Перевірка виконання умов Ω_2 . У випадку, якщо $s(m_{ab}) < s^o$ або $t_3(m_{ab}) > t_3^o$, якість маршрутів в МБСМ із ТАП вважається незадовільною, і

мережа потребує певного управлінського впливу (виведення або переміщення ТАП). [3]

Для виконання кроків запропонованої методики розроблені математичні моделі, що дозволяють розрахувати інтенсивність трафіку в кожному каналі МБСМ із ТАП.

3.3 Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах МБСМ із ТАП

На основі апарату теорії телекомунікаційних мереж [49] та теорії масового обслуговування [83] для розрахунку інтенсивності трафіку в каналах МБСМ із ТАП розроблені прості математичні моделі (рис. 3.1).

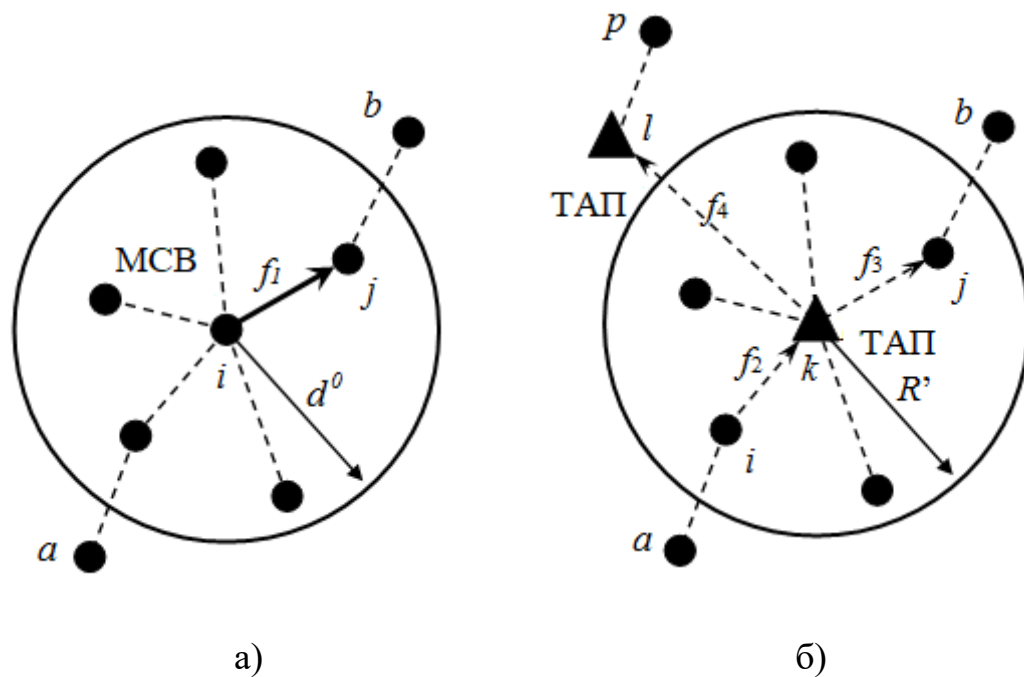


Рисунок 3.1 - Моделі МБСМ із ТАП для розрахунку інтенсивності трафіку в каналі МСВ-МСВ (а) та в каналах МСВ-ТАП, ТАП-ТАП (б)

За допомогою запропонованих моделей можемо розрахувати інтенсивність трафіку в кожному каналі МБСМ із ТАП, як суму

інтенсивностей потоків між визначеною парою відправник-одержувач γ_{ab} , маршрути яких проходять через заданий канал.

В цьому випадку для широкомовного одночастотного каналу МСВ-МСВ інтенсивність трафіку визначимо за наступною формулою:

$$\lambda_i^{(1)} = \sum_{j \in N_i} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: i \in m_{ab}, \quad a \neq b \quad (3.1)$$

де N_i – множина сусідів i -ого МСВ, включаючи i .

Для спільного каналу МСВ-ТАП та широкомовного каналу ТАП-МСВ інтенсивність трафіку можна визначити наступним чином:

$$\lambda_{ik}^{(2)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: ik \in m_{ab}; \quad \lambda_{kj}^{(3)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad (3.2)$$

$$a, b: kj \in m_{ab}, \quad a \neq b,$$

де N_k – множина МСВ, що покриті k -м ТАП.

Інтенсивність трафіку в одному напрямку для дуплексного багаточастотного каналу ТАП-ТАП можна визначити наступним чином:

$$\lambda_{kl}^{(4)} = \sum_{k=l=1}^K \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: kl \in m_{ab}, \quad k \neq l, \quad a \neq b, \quad (3.3)$$

де K – кількість введених ТАП.

3.4 Дослідження пропускної здатності каналів МБСМ із ТАП

Ефективність роботи протоколу множинного доступу до загального каналного ресурсу в МБСМ із ТАП визначається наступними параметрами: середня швидкість передачі даних, середня затримка передачі даних і

граничне значення трафіку, при якому досягається межа стійкості МБСМ із ТАП [45], [84]. Ці параметри визначаються як функція таких основних системних параметрів, як довжина пакету, швидкість передачі, інтенсивність трафіку, геометричні розміри МБСМ із ТАП або інтервал уразливості, їх узагальнюючий.

Середня швидкість передачі даних представляє собою математичне очікування випадкової величини, яка визначає кількість пакетів, переданих безконфліктно за одиницю часу. В дисертаційній роботі за одиницю часу прийнято час передачі T пакету заданої довжини, тоді максимальне теоретичне значення середньої швидкості передачі буде дорівнювати одиниці. Максимальне значення середньої швидкості передачі у літературі також часто називають пропускнуою здатністю або ємністю протоколу МД.

Середня затримка передачі даних представляє собою нормований інтервал часу від моменту появи на вході мережевого вузла МБСМ із ТАП запиту на передачу пакету даних до завершення його безконфліктної передачі. При цьому враховується затримка доступу, що визначається як час до моменту отримання дозволу на передачу, і затримка на повторну передачу, що обумовлена пошкодженням пакетів при їх інтерференції. Середню затримку передачі даних буде розраховано у наступному підрозділі.

Максимальне значення трафіку, що відповідає межі стійкої роботи мережі, характеризує область використання протоколу МД у конкретних умовах і визначає кількість МСВ МБСМ у зоні дії МСВ-ретрансляторів та ТАП, що визначається далі у розділі.

Для аналізу зазначених характеристик та для визначення їх потенційно можливих значень будемо використовувати відомі аналітичні моделі, які використовують елементів теорії відновлення та припущення, що кількість МСВ нескінченно велика і кожен з них створює пакети даних з нескінченно малою швидкістю. Останнє є припущенням про пуасонівський характер процесу надходження пакетів до МСВ для передачі по радіоканалу. Інтенсивність надходження пакетів при цьому вимірюють кількістю пакетів,

що надійшли за час передачі пакету T , та позначають буквою G . Середню швидкість передачі S також вимірюємо в кількості пакетів за час T , але тільки тих, що передані безконфліктно. Додатково припускається, що всі пакети мають однакову довжину L . Модель оперує із середніми значеннями часових відрізків стану радіоканалу. Квитанції, тобто службові пакети, що підтверджують вдалий прийом пакету даних, також мають нормовану довжину і передаються безконфліктно по окремому каналу.

Під інтенсивністю G надходження пакетів на передачу будемо розуміти сумарну інтенсивність, що включає вхідний потік первинних пакетів Z_1 та потік пакетів Z_2 , які передаються повторно. Потік Z_1 кожного вузла формується як з власних пакетів, так і з тих, що потрібно ретранслювати від інших вузлів МБСМ із ТАП (визначається відповідно до заданої матриці тяжіння Γ), потік Z_2 визначається процедурними характеристиками протоколу МД та значеннями його інтервалу часу перед повторною передачею. Для стійкої роботи мережі на практиці інтенсивність мережевого трафіку не має перевищувати $0,8g$, де параметр g – це поріг стійкості, якій визначається типом протоколу МД [85].

Пропускна здатність маршруту визначимо як мінімальну пропускна здатність каналу, що входить до його складу:

$$s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}. \quad (3.4)$$

Пропускна здатність каналу визначимо як середню швидкість передачі пакетів, тобто середню кількість пакетів, переданих безконфліктно за інтервал часу (за одиницю часу в дисертаційній роботі прийнято час передачі пакету $T = \mu$). Дана величина залежить від обраного протоколу множинного доступу. Для каналів МСВ-МСВ оберемо протокол множинного доступу із сигналом «зайнято» (МДСЗ), що вирішую проблему «схритих абонентів». Для каналів МСВ-ТАП-МСВ оберемо адаптивний протокол

множинного доступу із резервуванням пакетів (АПР), який дозволяє надсилати блоки з n пакетів та управляти розміром блоку в залежності від інтенсивності трафіку, що створюють МСВ на етапі оперативного управління. Для каналів ТАП-ТАП згідно стільникового принципу обрано частотне ущільнення з динамічним розподілом часового інтервалу всередині окремої комірки [86], тобто пакети даних передаються на окремій частоті фактично без колізій і пропускна здатність таких каналів дорівнює 1.

Середню швидкість передачі для каналу МСВ-МСВ, який працює на частоті f_1 з використанням протоколу МДСЗ, визначимо за наступною формулою [85]:

$$s_{ij}^{(1)} = \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{(\exp(2aG_{\Sigma}^{(1)}) - 1)((5a + \tau + 0,5)G_{\Sigma}^{(1)} + \exp(-2aG_{\Sigma}^{(1)})) + G_{\Sigma}^{(1)}(4a + \tau + 1) + 1} \quad (3.5)$$

де a , τ – нормований максимальний час поширення радіосигналу та службового сигналу «зайнято»;

$G_{\Sigma}^{(1)} = \frac{\lambda_i^{(1)}}{\mu} = \lambda_i^{(1)}T$ – сумарна інтенсивність трафіку, що надходить в канал

МСВ-МСВ, нормована до тривалість передачі пакету T .

Підставляючи у вираз (3.5) наступні вихідні дані: $L=1024$ біт, $c=3 \cdot 10^8$ м/с, $V=11$ Мбіт/с, отримаємо наступні графіки залежності S МСВ-МСВ на каналному рівні (рис. 3.2, 3.3, 3.4).

Аналізуючи графіки на рис. 3.2, бачимо, що середня швидкість передачі монотонно зменшується при збільшенні максимальної відстані x між вузлами. Це пояснюється тим, що при збільшенні відстані x зростає зона уразливості a , що при організації МД спричиняє ріст кількості колізій. Також відповідно рис. 3.3 збільшення відстані x зменшує межу стійкості g та діапазон стійкої роботи протоколу МД. Для $x=300$ м ($a=0,011$) межа стійкості g становить приблизно 9 ($S_{\max} \approx 0,81$), для $x=500$ м ($a=0,0183$) -

$g \approx 6,8$ ($S_{\max} \approx 0,76$), а для $x=1000\text{м}$ ($a=0,0366$) - $g \approx 4,6$ ($S_{\max} \approx 0,67$). Як видно з рис. 3.4 проблему збільшення ПЗ при заданій відстані x (або збільшення максимальної відстані x між МСВ при заданій S) можна вирішити збільшенням довжини пакету L , але при цьому зростає ймовірність ураження пакету завадою та час доставки пакету в мережі.

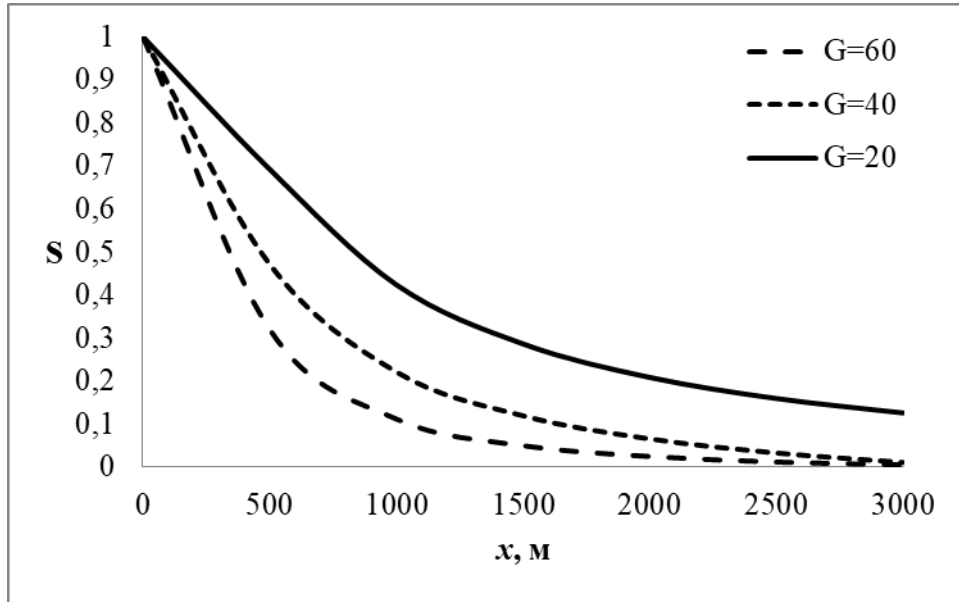


Рисунок 3.2 - Залежність ПЗ каналу МСВ-МСВ від відстані між МСВ при різних значеннях інтенсивності трафіку

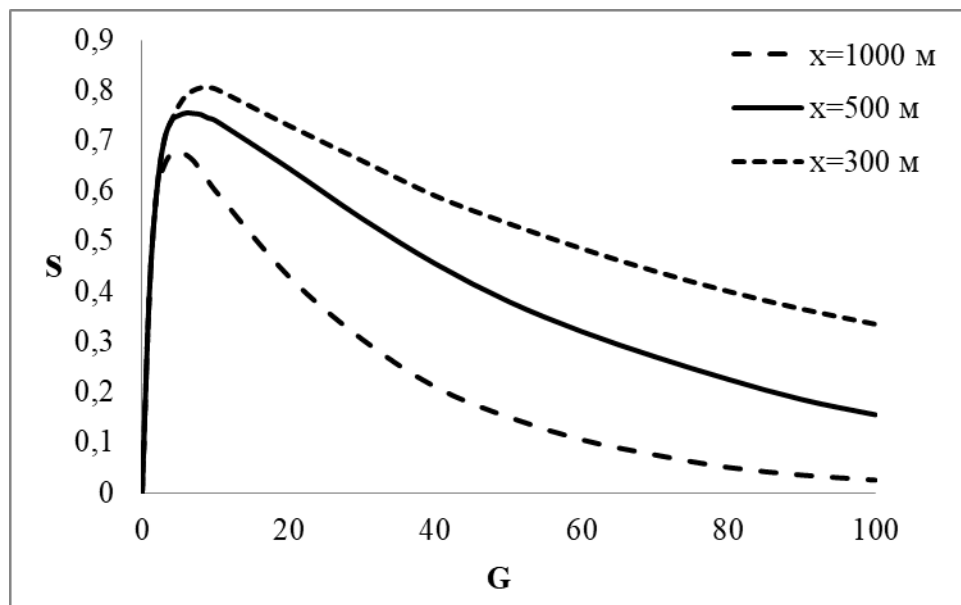


Рисунок 3.3 - Залежність ПЗ каналу МСВ-МСВ від інтенсивності трафіку при різних значеннях відстані між МСВ

Цю проблему також можна вирішити зменшенням швидкості передачі V (тобто зменшенням виділеної частотної смуги Π), але це нераціонально, тому що при цьому погіршуються інші характеристики мережі, а саме ПЗ та коефіцієнт використання смуги частот. Таким чином, вибір максимальної відстані x між вузлами (радіусу радіо покриття МСВ) при заданих V та L визначається мінімальним допустимим значенням ПЗ протоколу МД.

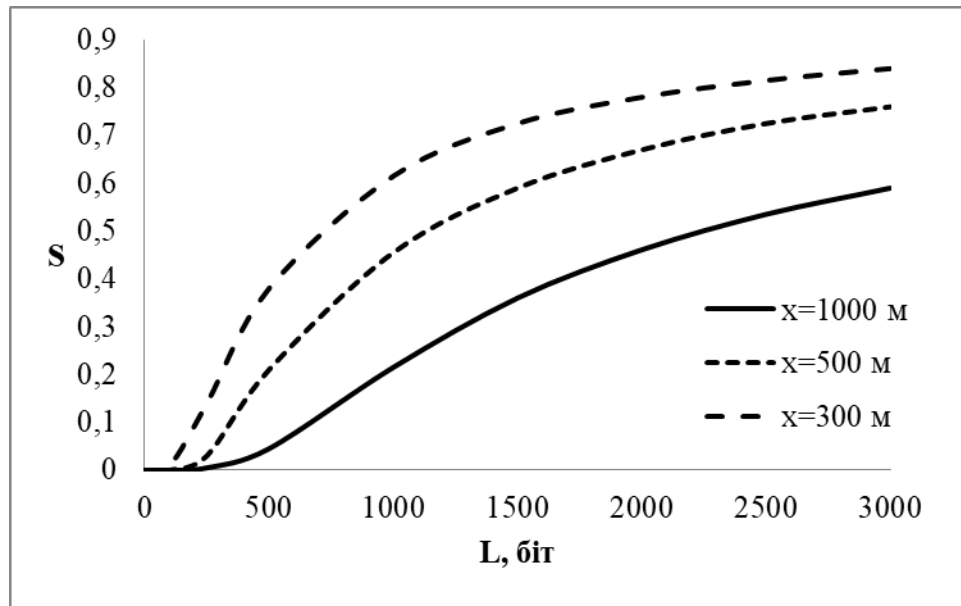


Рисунок 3.4 - Залежність ПЗ каналу МСВ-МСВ від довжини пакету L при різних значеннях відстані між МСВ (при $G=40$)

Доступ до каналного ресурсу мережі ТАП можливий декількома способами:

1. Створення n - частотного моноканалу, до якого підключені всі МСВ. В роботі [85] детально розглянуто 2- частотний моноканал. Такий спосіб дозволяє кожен з пакетів, переданих МСВ, ретранслювати через мережеві ретранслятори в усіх стільниках МБСМ. Для того, щоб уникнути самозбудження ланцюжка ретрансляторів, кожен з них повинен після передачі пакету мати період не чуттєвості, якій дорівнює $2a+1$, що збільшує затримку передачі кожного пакету. Мобільність ТАП також значно ускладнює дотримання захисного інтервалу між стільниками, що працюють

на однакових частотах. Для вирішення цих проблеми можна застосувати більшу кількість робочих частот та розробити ефективний метод розподілення радіочастотного ресурсу, адаптивного до переміщення ТАП у просторі, однак це є предметом окремого дослідження.

2. Перелічені вище проблеми вирішуються за допомогою спеціальних процедур МД та маршрутизації, які можуть значно зменшити кількість ретрансляції та збільшити ПЗ мережі. В роботі [85] показано, що за допомогою адаптивних процедур резервування пакетів та вирішенням конфліктів можливо забезпечити ПЗ МД S не нижче 0,9 при $a=0,01$ в досить широкому діапазоні трафіку G . Інтервал уразливості $a=0,01$ в залежності від системних параметрів відповідає відстані між ретрансляторами від 5 до 15 км, що цілком задовольняє для організації МБСМ із ТАП на основі мініатюрних БПЛА. Також ці процедури дозволять на відміну від звичайного МДСЗ швидко адаптуватися до змін вхідного трафіку, пов'язаного мобільністю МСВ та ТАП.

Для адаптивного протоколу випадкового МД із резервуванням (АПР), наприклад, значення середньої швидкості передачі у каналах МСВ-ТАП можна визначити наступним чином:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1+GB} \quad (3.6)$$

де

N – розмір зарезервованого блоку пакетів;

B – середній час зайнятого стану каналу, який визначається наступним чином:

$$B = (N + b + 2a - r) \exp(-aG) + b + a + r, \quad (3.7)$$

де b – тривалість пакету резервування, що надсилає МСВ, та пакету дозволу на передачу, що надсилається у відповідь ретранслятором;

r – тривалість часу після надходження останнього конфліктного пакету, який визначається наступним чином:

$$r = a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G}. \quad (3.8)$$

Враховуючи, що параметром G позначається інтенсивність надходження блоків з N пакетів, пропускна здатність каналів МСВ-ТАП, ТАП-ТАП має значення:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + G((N + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G})} \quad (3.9)$$

Підставляючи наступні вихідні дані: $L = 1000 \text{ біт}$, $V = 11 \text{ Мбіт/с}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ у вираз (3.9), матимемо наступні графіки залежності S каналів МСВ-ТАП та ТАП-ТАП (рис. 3.5– 3.9).

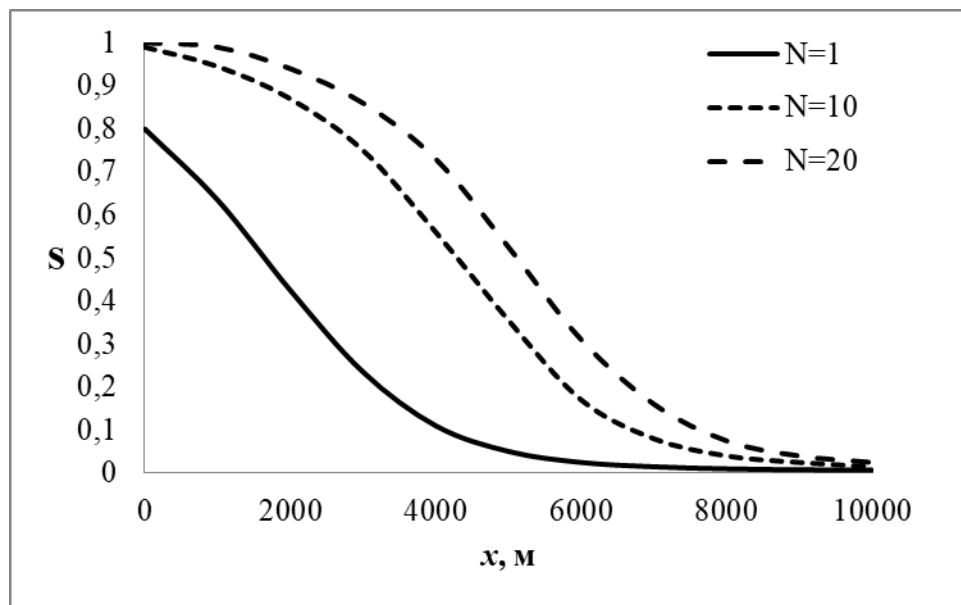


Рисунок 3.5 - Залежність ПЗ каналу МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) від відстані між мережевими вузлами для різних значень розміру блоку резервування (при $G=20$)

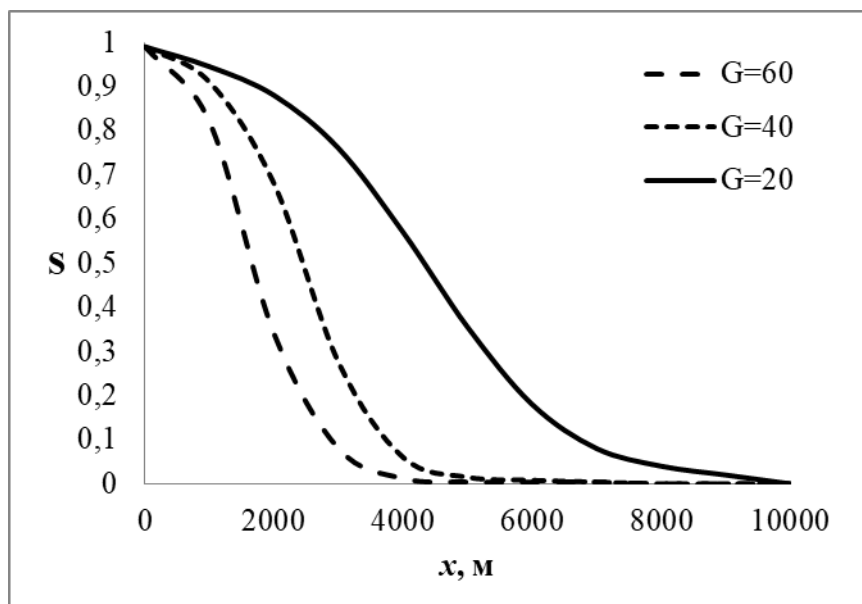


Рисунок 3.6 - Залежність ПЗ каналу МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) від відстані між мережевими вузлами для різних значень інтенсивності трафіку (при $N=10$)

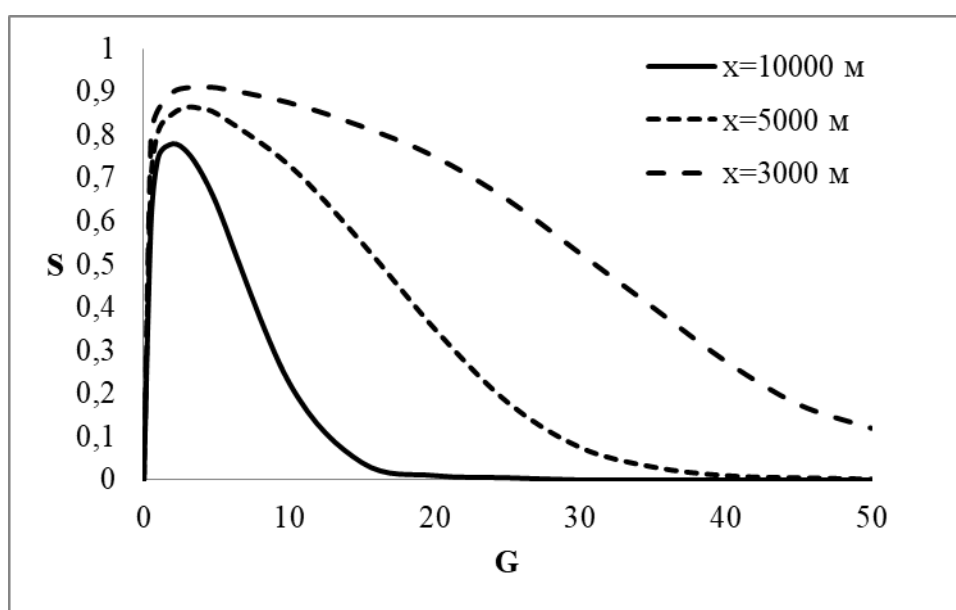


Рисунок 3.7 - Залежність ПЗ каналу МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) від інтенсивності трафіку для різних значень відстані між мережевими вузлами (при $N=10$)

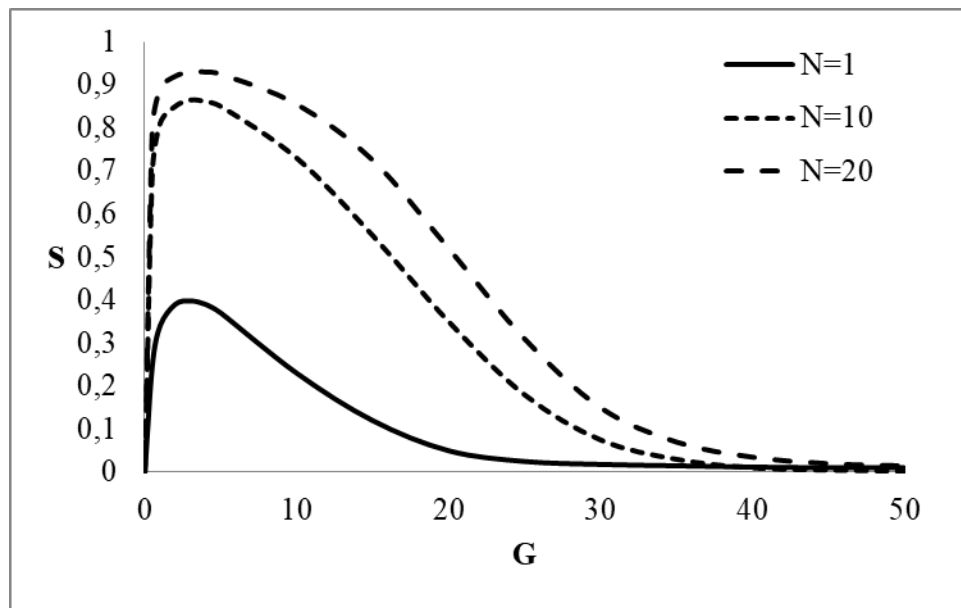


Рисунок 3.8 - Залежність ПЗ каналу МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) для різних значень розміру блоку резервування (при $x = 5000$ м) від інтенсивності трафіку

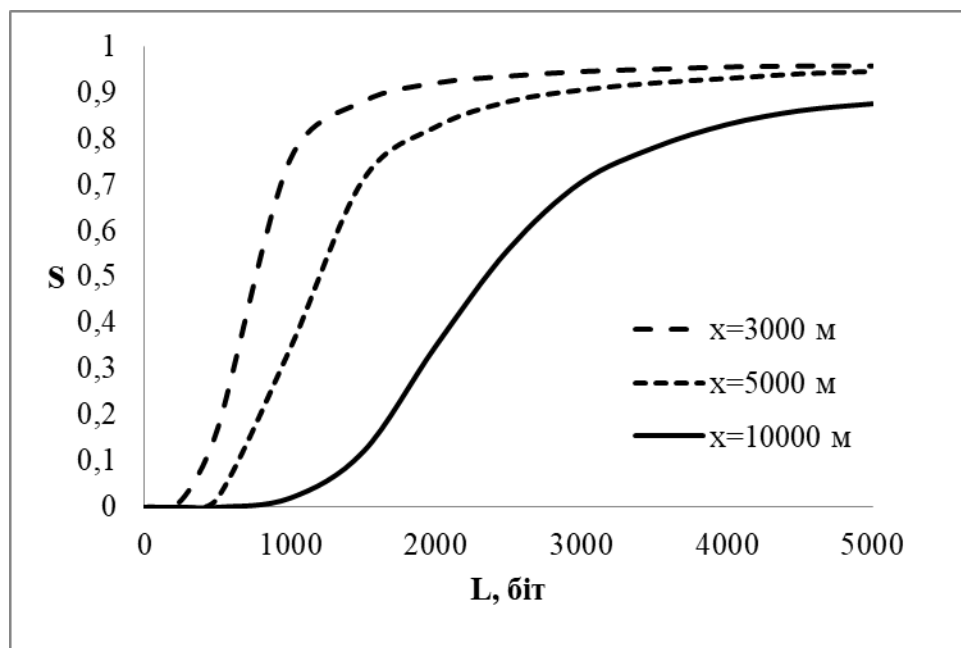


Рисунок 3.9 - Залежність ПЗ каналу МСВ-ТАП (ТАП-ТАП) від довжини пакету L при різних значеннях відстані між мережевими вузлами (при $N=10$, $G=20$)

За допомогою аналітичних моделей для обраних протоколів МД та з урахуванням вихідних даних, вказаних вище, отримаємо графіки залежності ПЗ каналів МСВ-МСВ та МСВ-ТАП-МСВ від вхідного навантаження G (середньої кількості пакетів, які надійшли протягом часу передачі одного пакету $T = \mu$) (рис. 3.10).

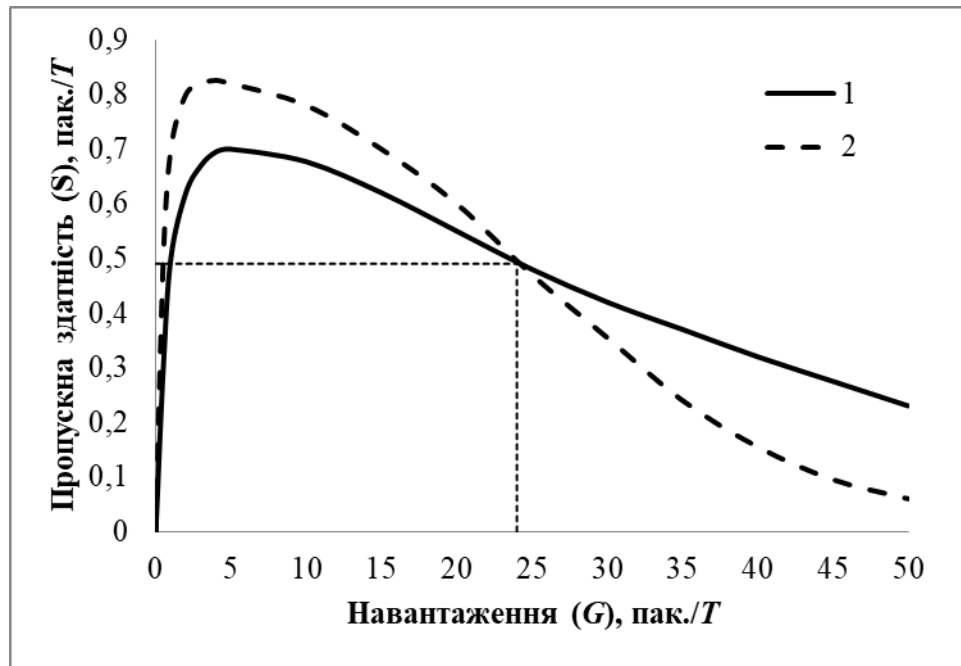


Рисунок 3.10 - Залежність пропускної здатності каналів від вхідного навантаження:

1 – канал МСВ-МСВ (МДС3), 2 – канал МСВ-ТАП-МСВ (АПР, $N=5$)

Аналізуючи графіки на рис. 3.10, бачимо, що канали МСВ-ТАП-МСВ мають більшу ПЗ ніж канали МСВ-МСВ при однаковій інтенсивності трафіку (навантаженні) у діапазоні $0 \dots 24$ пак./Т, що відповідає мінімально можливому рівню ПЗ ($s^0 = 0,5$). У цьому випадку для підвищення ПЗ МБСМ із ТАП доцільніше буде передавати дані через мережу ТАП при умові, як що затримка передачі повідомлень в маршруті не перевищує заданого значення.

3.5 Дослідження затримки передачі в каналах МБСМ із ТАП

Інформаційна взаємодія на мережевому рівні між будь-якою парою МСВ потребує наявності маршруту передачі повідомлень заданої якості (QoS). Критерієм якості маршруту (наприклад, при передачі голосового повідомлення) може виступати кількість ретрансляцій або затримка передачі пакету через мережу проміжних вузлів-ретрансляторів із кінця в кінець. У загальному вигляді величина затримки має наступний вигляд:

$$D = T_{\text{пак}} + T_{\text{дост}} + T_{\text{пош}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}},$$

де $T_{\text{пак}}$ – час пакетизації (створення пакету вузлом-відправником), що залежить від типу трафіку (визначається алгоритмом формування пакету, наприклад, для голосу залежить від способу кодування); $T_{\text{дост}}$ – значення середнього часу затримки доступу до каналу з випадковим МД, яке залежить від інтенсивності трафіку та пропускну здатності каналу; $T_{\text{пош}}$ – час поширення сигналу в середовищі передачі, яке не залежить від типу трафіка; $T_{\text{обр}}$ – час на обробку пакету в транзитних мережевих вузлах (залежить від типу трафіку); $T_{\text{буф}}$ – час затримки пакетів у буферах транзитних мережевих вузлів (залежить від типу трафіку, пріоритетності трафіку, дисципліни обслуговування). Наприклад, для ІР пакету з середньої довжиною 576 біт час пакетизації при швидкості кодування 64кбіт/с становить 9 мс. Цим значенням можна знехтувати при грубій оцінці затримки передачі. Будемо також вважати, що пакети, які знаходять отримувачу, відразу потрапляють в буфер, тому $T_{\text{обр}}$ теж дорівнює нулю.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування, МБСМ із ТАП можна представити сукупністю блоків системи масового обслуговування (СМО) типу М/Г/1 (рис. 3.11).

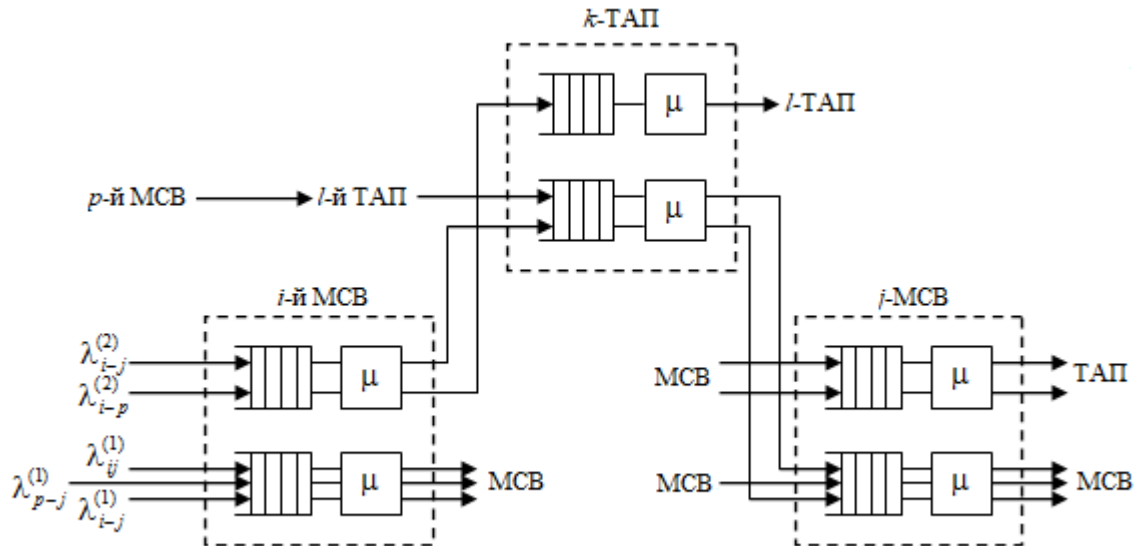


Рисунок 3.11 - МБСМ із ТАП, як мережа блоків СМО типу М/Г/1

Середній час перебування пакета в черзі буферу розрахуємо за наступною формулою [1], [87]:

$$T_{\text{буф}} = T + W^{(z)}(1 + v^2) = \frac{1}{\mu} + \frac{G_{\Sigma}^{(z)}}{2\mu(1 - G_{\Sigma}^{(z)})}(1 + v^2), \quad (3.10)$$

де $W^{(z)}$ - значення середнього часу затримки пакету в черзі при $\mu = \text{const}$;

v – коефіцієнт варіації μ ;

$G_{\Sigma}^{(z)} = \frac{\lambda_{\Sigma}^{(z)}}{\mu} = \lambda_{\Sigma}^{(z)}T$ - сумарна інтенсивність трафіку, що надійшла на частоті z

[1].

Імітаційне моделювання середнього часу перебування пакету в блоці СМО типу М/Г/1 (табл. 3.1) підтверджує адекватність обраної аналітичної моделі (3.10).

Таблиця 3.1 – Результати імітаційного моделювання середнього часу знаходження пакету в блоці СМО типу M/G/1

Кількість оброблених пакетів в	Інтенсивність надходження пакетів λ	Час обслуговування $1/\mu$	Коефіцієнт варіації ν	$T_{буф}$ (результати розрахунку)	Результати імітаційного моделювання	
					$T_{буф}$	СКВ σ_T
10000	$1 \cdot 10^3$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$4,49 \cdot 10^{-6}$	1,258
10000	$1 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$4,02 \cdot 10^{-4}$	1,412
10000	$1,099 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,45	0,32	1,505

В цьому випадку середній час затримки передачі пакету на ланці МСВ-МСВ матиме наступний спрощений вигляд:

$$D_{ij} = \left(\frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{s_{ij}^{(1)}} - 1 \right) (\tau + 4a + 0,5 + Y + X) + \tau + 4a + 1 + W_i^{(1)}, \quad (3.11)$$

де X – нормований середній час затримки повторної передачі пакету;

Y – нормоване значення середнього часу початку передачі останнього конфліктуючого пакету.

Формулу для середнього часу затримки передачі пакету на ланці ТАП-ТАП (МСВ-ТАП) представимо в наступному вигляді:

$$D_{ik} = \frac{1}{N} \left(\left(\frac{1}{P} - 1 \right) (X + (b + a + r)P_l) + N + a + W_i^{(2)} + W_k^{(3)} \right), \quad (3.12)$$

де $P = \frac{\exp(-aG)}{1 + GB}$ - значення ймовірності успішної передачі блоку пакетів;

$P_l = \frac{1}{1 + GB}$ - значення ймовірності вільного стану радіоканалу.

Через те що канали ТАП-ТАП працюють з частотним розділенням і не заважають один одному, будемо вважати, що максимальна затримка передачі

в каналах ТАП-ТАП однакова і визначається лише затримкою поширення та затримкою в буферах проміжних вузлів, тобто $D_{kl} = a + W_k^{(4)}$.

Використовуючи наступні вихідні дані: $L=1024\text{біт}$, $c=3\cdot 10^8\text{м/с}$, $V=11\text{Мбіт/с}$, $b=0,1$, $X=2$ у вирази (3.11), (3.12), отримаємо наступні графіки залежності середньої затримки передачі від інтенсивності трафіку для однієї ланки МСВ-МСВ (при $x=600\text{м}$) та для однієї ланки ТАП-МСВ (при $x=3000\text{м}$, $N=10,20,30$) (рис. 3.12).

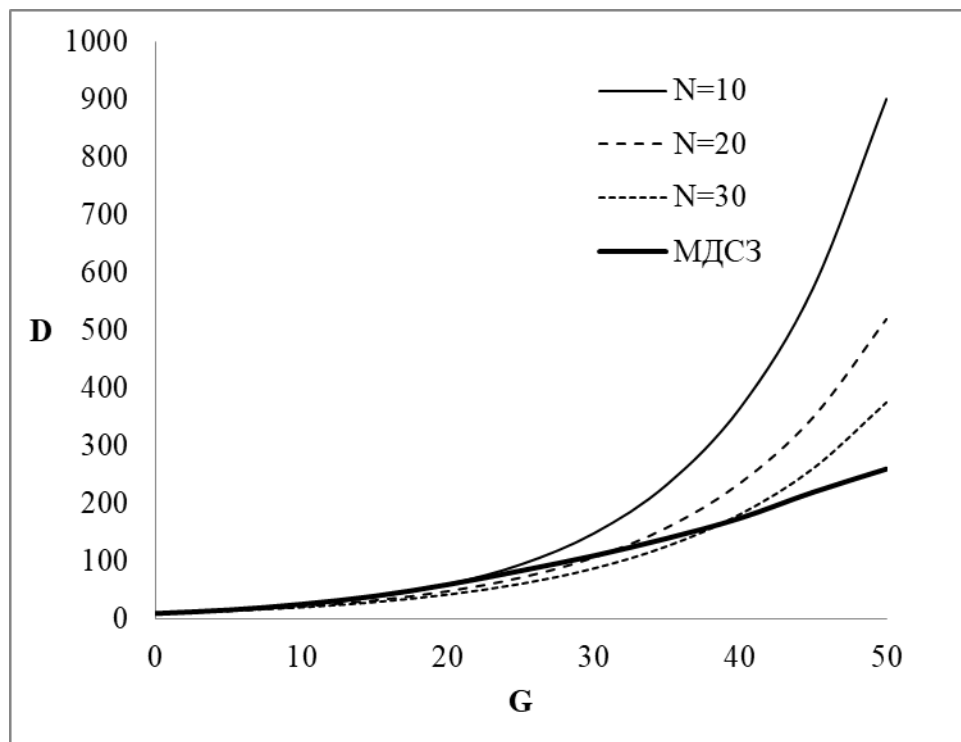


Рисунок 3.12 - Графіки залежності середньої затримки передачі від інтенсивності трафіку для однієї ланки МСВ-МСВ (при $x=600\text{м}$) та для однієї ланки МСВ-ТАП-МСВ (при $x=3000\text{м}$, $N=10,20,30$)

Аналіз рис. 3.12 показує, що ланка МБСМ із застосуванням ТАП має менший час затримки ніж ланка МСВ-МСВ при інтенсивності трафіку менше ніж 30 пак./Т, граничне значення інтенсивності трафіку при цьому тим більше, чим більше розмір блоку пакетів протоколу АПР. При однаковій затримці передачі ланка із використанням ТАП має шестикратний виграш у відстані, тому для мінімізації затримки при передачі повідомлень на великі

відстані доцільніше передавати повідомлення через мережу ТАП, а на короткі – через мережу МСВ. Також виникає практичний інтерес визначити граничну кількість ретрансляцій через МСВ, при якій необхідно переключатися на мережу ТАП.

Якщо вважати, що маршрут передачі повідомлень складається з l ланок і в кожній ланці однакова середня інтенсивність трафіку, тоді загальну затримку пакету «із кінця в кінець» через транзитні МСВ та ТАП можна визначити наступним чином:

$$t(m_{ab}) = D_{ij} \cdot l; \quad t(m_{ab}) = D_{ik} + (a + W_k)l \quad (3.13)$$

Використовуючи отримані аналітичні моделі обраних протоколів МД (3.13) побудуємо графік залежності середньої затримки передачі пакетів в маршруті від кількості ретрансляцій та різних варіантах передачі (рис. 3.13).

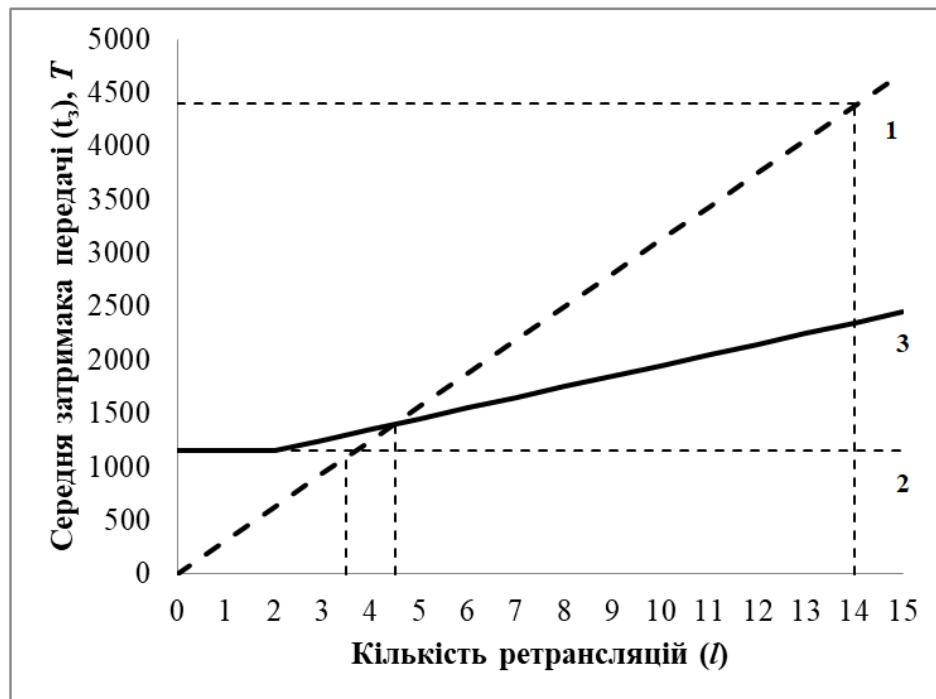


Рисунок 3.13 - Залежність середньої затримки від кількості ретрансляцій та різних варіантах передачі: 1 – через мережу МСВ, 2 – через один ТАП, 3 – через мережу ТАП

Аналіз рис. 3.13 показує, що максимальна кількість ретрансляцій при передачі через мережу МСВ і заданої величини затримки ($t_3^0 = 400\text{мс}$), має бути не більше 14. З метою скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах пакети доцільно передавати через мережу ТАП. При цьому всередині стільника ТАП пакети вигідніше ретранслювати при кількості ланок більше ніж 3, а по каналам ТАП-ТАП – при кількості ланок більше ніж 4.

3.6 Визначення кількості кінцевих МСВ в стільниках МСВ та ТАП

Кількість кінцевих МСВ в стільниках n може визначено наступним чином. При заданому значенні параметру a , що визначається максимальною відстанню x , для обраного протоколу МД встановлюється залежність ПЗ каналу S від трафіку G . Наприклад, для гнучного МДСЗ залежність ПЗ каналу S від трафіку G відображається виразом (3.5), а для АПР – виразом (3.9). Графік вказаних залежностей показані відповідно на рис. 3.3 та рис. 3.7. Абсциса екстремума функції $S(G)$ або її граничного значення (наприклад, 0,5) визначає для заданного протоколу при $a=a_{\max}$ гранично допустимий трафік G_{\max} . Виходячи з вимог щодо стійкості режиму мережі, ставимо наступну вимогу $\sum_{i=1}^n \overline{G}_i < G_{\max}$, де \overline{G}_i - середнє значення трафіку, що генерує кожен кінцевий МСВ стільника МБСМ із ТАП.

Задаючи значення \overline{G}_i , знаходимо верхню границю числа кінцевих МСВ стільника мережі:

$$n_{\max} \leq G_{\max} / \overline{G}_i \quad (3.14)$$

При даній кількості кінцевих МСВ не виключено, що середня затримка передачі пакетів D може перевищувати допустимі значення. Тому використаємо залежність величини середньої затримки передачі від ПЗ

протоколу МД $D(S)$, що визначається виразом (3.11) для МДСЗ та виразом (3.12) для АПР. Задаючи допустимі значення $D_{\text{доп}}$, знайдемо оптимальне значення пропускної здатності протоколу $S_{\text{опт}}$ та відповідне значення трафіку $G_{\text{опт}}$. Тоді оптимальна кількість кінцевих МСВ стільника мережі буде визначена наступним чином:

$$n_{\text{онт}} = G_{\text{онт}} / \overline{G_i} \quad (3.15)$$

За допомогою виразів (3.5) та (3.9) та обмеження пропускної здатності $S=0,5$ отримаємо наступні значення допустимого граничного трафіку: для стільника МСВ значення трафіку пакетів при $x=600\text{м}$ становитиме $G'_{\text{max}} \approx 35$, для стільника ТАП значення трафіку пакетів (при $x=3000\text{м}$, $N=10$) становитиме $G''_{\text{max}} \approx 300$. Задаючи середнє значення трафіку пакетів для одного абонента $\overline{G_i} = 5$ і використовуючи вираз (15), отримаємо, що максимальна кількість МСВ в зоні радіопокриття окремого МСВ становитиме $n'_{\text{max}} \leq 7$, а в зоні радіо покриття ТАП – становитиме $n''_{\text{max}} \leq 60$. Максимальна кількість ТАП в зоні дії одного ТАП залежить від розподілу потоків між мережевими вузлами, (тобто від кількості даних, що передається за межі стільника), але не перевищує декількох одиниць через міркування щодо забезпечення заданої електромагнітної сумісності (ЕМС) і безаварійного переміщення ТАП у просторі [3].

Наведений розрахунок носить наближений характер тому, що окрім припущення щодо пуасонівського характеру потоку, ми задаємося середнім та рівним значенням трафіку, якій генерується усіма МСВ, що не виконується на практиці. Не зважаючи на це, наведений розрахунок можна вважати справедливим при умові неперевикнення усіма МСВ сумарної допустимої величини трафіку в МБСМ із ТАП, що обмежується максимальною середньою затримкою передачі пакетів. Саме цей параметр,

якій кожний МСВ вимірює за допомогою обліку часу отримання квитанцій на послідовність переданих пакетів, може обмежувати згенерований їм трафік або визначати момент переходу передачі пакетів з мережі МСВ в мережу ТАП та навпаки. Знаючи кількість МСВ, їх координати та трафік створюваний ними, для ТАП можна визначити оптимальне розміщення у просторі, що дасть змогу забезпечити геометричну зв'язність МСВ і підвищити пропускну здатність мережі завдяки з'єднанню віддалених МСВ та розвантаженню перевантажених каналів в районах скупчення МСВ. Зазначений принцип буде використано при розробці методу управління топологією мережі ТАП в розділі 4.

3.7 Висновки з розділу 3

1. Запропоновано прості математичні моделі для розрахунку інтенсивності трафіку, що передається каналами МБСМ із ТАП, з урахуванням особливостей функціонування мережі (частотного розподілу, МД), що дозволяють розраховувати пропускну здатність МБСМ із ТАП.
2. Показано, що канали МСВ-ТАП-МСВ мають більшу пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковій інтенсивності трафіку у діапазоні до 24 пак./Т для мінімально можливого рівня ПЗ ($s^0 = 0,5$). В цьому випадку для підвищення ПЗ МБСМ доцільніше передавати дані через мережу ТАП при умові, що затримка передачі пакетів в маршруті не перевищує задану.
3. При передачі повідомлень на відстані, більші дальності прямого з'єднання, потрібно використовувати механізм ретрансляції пакетів через проміжні мережеві вузли. Максимальна дальність зв'язку в цьому випадку залежить від заданої величини затримки передачі пакетів «із кінця в кінець», що забезпечує необхідну якість обслуговування. Для застосувань реального часу невисокої інтерактивності (дані, голос)

максимальна кількість ретрансляцій при передачі через мережу МСВ і $t_3^0 = 400\text{мс}$ повинна бути не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій доцільніше передавати пакети через мережу ТАП. При цьому всередині стільника ТАП пакети вигідніше ретранслювати при кількості ланок більше ніж 3, а по каналам ТАП-ТАП – при кількості ланок більше ніж 4. Це можна використати для пошуку оптимального маршруту між заданою парою відправник-одержувач.

4 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МОБІЛЬНИХ БЕПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

Суть розробленого методу полягає в побудові спеціальної обчислювальної структури на основі математичних моделей оцінки структурної зв'язності МСВ, математичних моделей оцінки показників якості обслуговування МСВ і удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП та об'єднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення в режимі реального часу значень пропускної здатності МБСМ із ТАП, близьких до екстремальних [3].

4.1 Постановка задачі у математичному вигляді

Представимо МБСМ із ТАП стохастичним ненаправленим зваженим графом $G(V,E)$, який складається з множини вершин (МСВ і ТАП) $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$ і ребер $E = \{(i,j) | d_{ij} \leq d^0\} \cup \{(i,k) | R_{ik} \leq R^0\}$, $i, j = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$, що визначають матрицю зв'язності мережі $C = \|c_{ij}\|$, де $c_{ij} = \{0,1\}$ - булева змінна. В якості ваги ребра може виступати довжина відповідної радіолінії ($d_{ij}(R_{ik})$) [3]. Приклад графу $G(V,E)$ МБСМ із ТАП наведено на рис. 4.1

Пропускну здатність МБСМ із ТАП в цьому випадку можна визначити, як сумарну пропускну здатність усіх маршрутів МБСМ із ТАП, тобто

$$S(C) = \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), a \neq b, \text{ де } s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}. \quad (4.1)$$

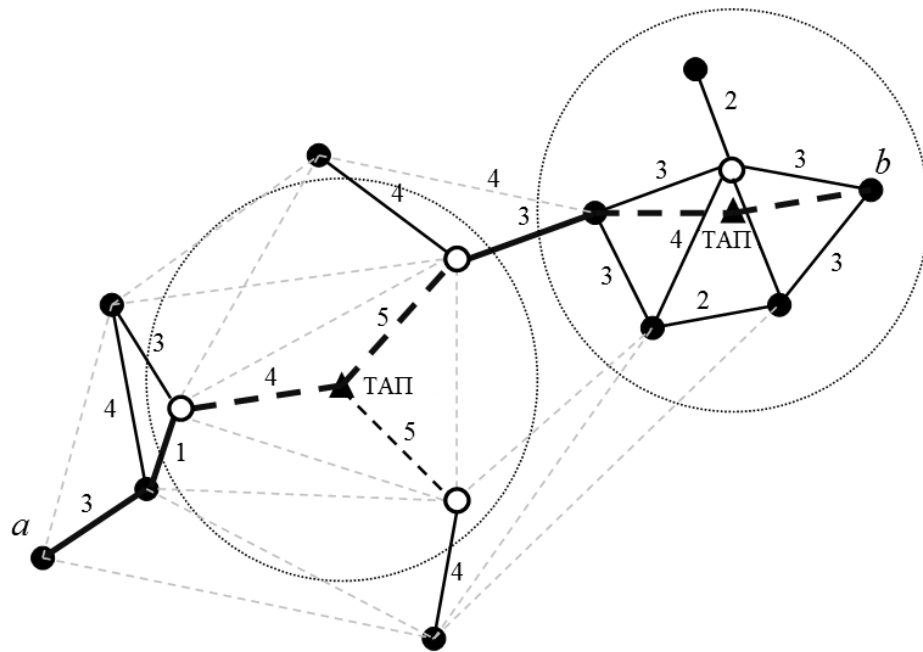


Рисунок 4.1 - Приклад графу $G(V,E)$ МБСМ із ТАП, вузлами якого слід вважати 14-цять МСВ та дві ТАП

Нехай задані наступні вихідні дані: N – кількість МСВ; K – кількість ТАП; r – розмір району дислокації МСВ, м²; $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, N}$, $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$ – координати положення МСВ і ТАП, виведених в момент часу t ; s^o – мінімально допустиме значення пропускної здатності маршруту m_{ab} ; $d^0(R^0)$ – максимальна дальність радіозв'язку, м; $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння; t_s^o – максимально допустиме значення затримки передачі повідомлень маршруту m_{ab} ; $\Pi_i = \|l(m_{ab})\|, a, b = \overline{1, N}$ – маршрутна таблиця, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляторів в маршруті [3].

Сформулюємо задачу управління положенням телекомунікаційних аероплатформ, що входять до складу МБСМ із ТАП наступним чином: знайти в режимі реального часу ($T_{\text{нов.реш.}} \ll T_{\text{зв.}}$) матрицю зв'язності S^* (координати положення ТАП в просторі $X_{0k}, k = \overline{1, K}$), що забезпечує максимум пропускної здатності МБСМ із ТАП $S(C)$ [3]:

$$C^* = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} S(C) = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{m_{ab}}, a \neq b \quad (4.2)$$

при виконанні наступних обмежень на множину управлінських дій та мережеві ресурси

$$\Omega_1 : \{d_{ij} \leq d^0, D_{ik} \leq D^0, T_{36\ ij} \geq T_{36}^0 \ \forall i, j \in m_{ab}\},$$

$$\Omega_2 : \{s(m_{ab}) \geq s^0, \overline{t_3} \leq t_3^0 \ (l(m_{ab}) \leq l^0)\},$$

$$\Omega_3 : \{1030 \leq h < 3000, R^0 \leq 1500\}.$$

4.2 Метод підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП

Для вирішення поставленої математичної задачі (4.2) запропоновано *метод* підвищення пропускної здатності МБСМ на основі використання ТАП шляхом *управління положенням ТАП*, який представлено у вигляді схеми-алгоритму на рис. 4.2:

Запропонований метод складається з наступних основних етапів, які поєднуються в єдину обчислювальну процедуру [3]:

1. Ідентифікація математичної моделі оцінки зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП.

2. Ідентифікація математичних моделей оцінки показників ефективності функціонування БСМ із МС та ТАП.

3. Побудови алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, загальна схема якого показана на рис. 4.3.

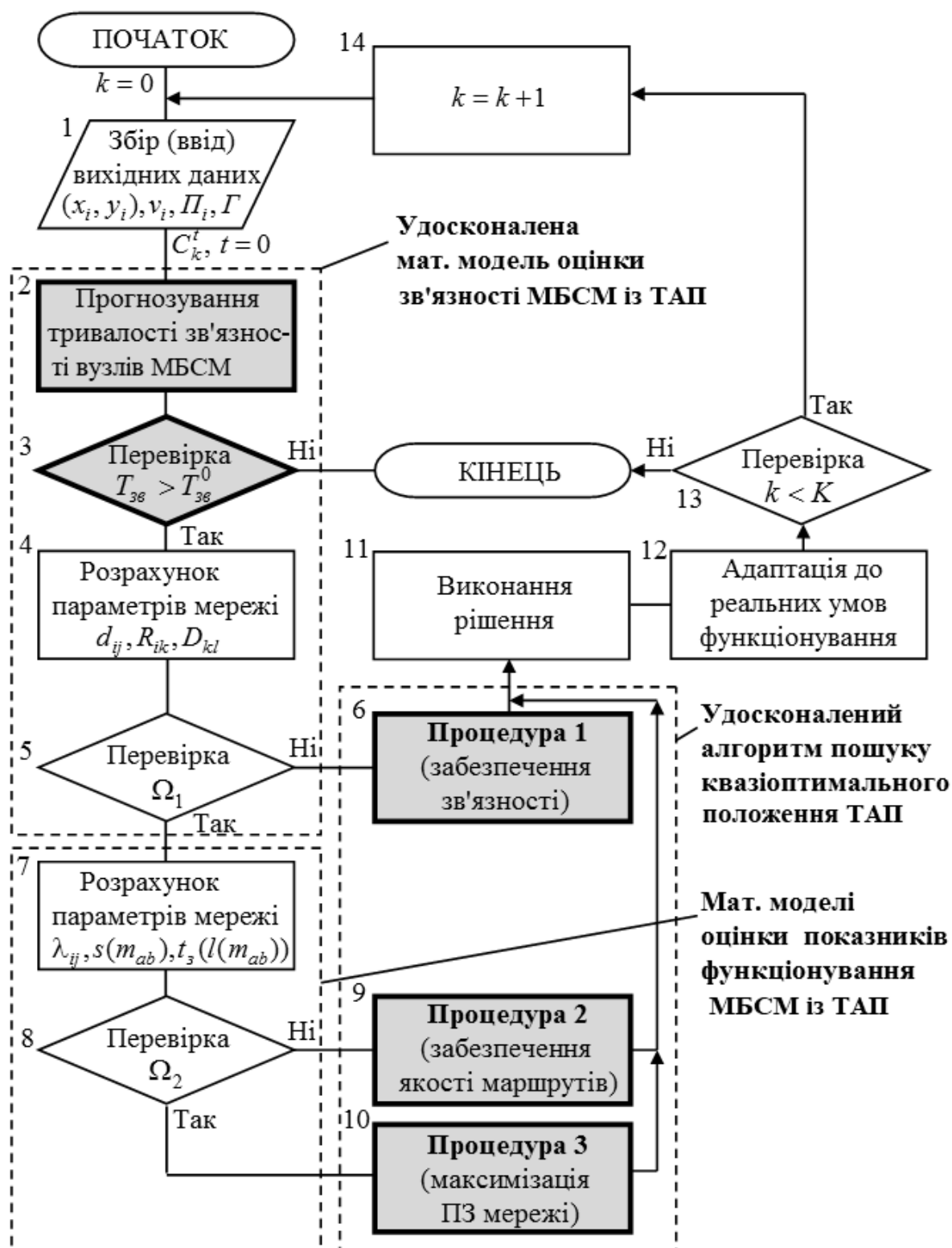


Рисунок 4.2 - Схема-алгоритм управління положенням ТАП, що входять до складу МБСМ із ТАП для підвищення ПЗ мережі (продовження на рис. 4.3)

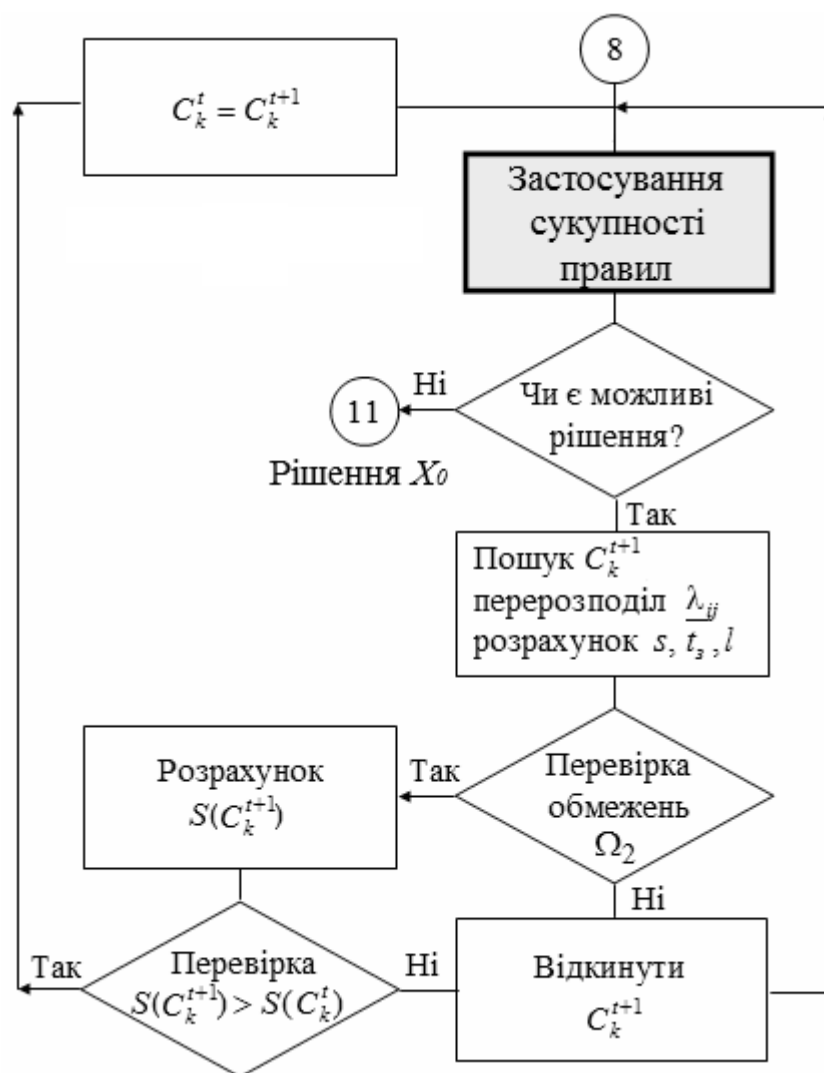


Рисунок 4.3 - Схема удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, що входять до складу МБСМ із ТАП із використанням сукупності правил (початок схеми на рис.4.2)

Управління топологією (місцеположенням) мережі ТАП включає в себе наступні кроки:

Крок 1. На етапі планування здійснюється збір інформації про початкову топологію МБСМ із ТАП та ввід вихідних даних (блок 1):

- параметрів МСВ, що отримані через систему збору інформації по окремому службовому каналу: $N, (x_i, y_i), S_i, i = \overline{1, N}$, виведених попередньо ТАП: $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}, j = \overline{1, K}$;

- допустимих значень параметрів в (41)-(43): $d^0, s^0, t_3^0 (l^0), D^0(R^0), r$;

- параметри протоколу МД та протоколу маршрутизації.
- кількість ТАП на операцію K ;

Параметри, що зазначені вище, та їх обмеження визначають початкову топологію МБСМ без застосування ТАП $C_k, k = \overline{1, K}$, k – номер ітерації пошуку рішення.

Крок 2. Прогнозування тривалості зв'язності вузлів МБСМ із ТАП на основі розроблених моделей переміщення МСВ (блок 2), перевірка умови $T_{зв\ ij} \geq T_{зв}^0$ (блок 3), за допомогою якої визначається можливість ТАП відпрацьовувати рішення до суттєвої зміни топології МБСМ із ТАП.

Крок 3. Аналіз існування структурної зв'язності (блоки 3 та 4):

1. Визначення параметрів d_{ij}, D_{ik} та D_{kl} .
2. Перевірка обмежень Ω_1 (блок 5). При виконанні умов перевіряється додаткова умова щодо цілісності мережі $k = 1$, інакше переходимо до кроку 4.

Крок 4. Забезпечення структурної зв'язності мережі (блок 6), шляхом виконання процедури 1 на основі спеціально розроблених правил (розглядається нижче).

При наявності нових рішень, які забезпечують виконання умов Ω_1 , виконується вивід ТАП у задану позицію (етап розгортання) (блок 11) і адаптація параметрів протоколу МД до функціонування в реальних умов (блок 12) згідно процедур вказаних у [85] (етап оперативного управління).

Далі здійснюється перевірка наявності апаратного ресурсу (ТАП) (блок 13). У випадку наявності ($k < K$), переходимо на крок 1, інакше – КІНЕЦЬ роботи алгоритму.

Крок 5. Збір інформації про функціонування МБСМ із ТАП (блок 1):

- матриці тяжіння Γ .
- матриці найкоротших маршрутів Π_i ;

Збір зазначеної вище інформації може виконуватися на етапі планування при наявності виведених ТАП (через канал зв'язку із ЦУ) або на

етапі розгортання МБСМ шляхом збору даних з будь-якого наземного вузла МБСМ із ТАП (за допомогою функціонування одного із протоколів маршрутизації [88]).

Крок 6. Проведення аналізу вимог до якості маршрутів передачі даних (блоки 7 і 8):

1. Проведення розрахунку параметрів функціонування МБСМ із ТАП λ , $s(m_{ab})$, $\bar{t}_3(l(m_{ab}))$ відповідно до співвідношень, що вказані у розділі 3.

2. Проведення перевірки виконання обмежень Ω_2 . При виконанні умови Ω_2 здійснюється перехід на крок 8, при невиконанні - на крок 7.

Крок 7. Забезпечення якості маршрутів шляхом виконання процедури 2 (блоки 9, 11-14) на основі спеціально розроблених правил (розглядається нижче).

При наявності нових рішень, які забезпечують виконання умов Ω_1 , виконується вивід у задану позицію ТАП (етап розгортання) (блок 11) і адаптація параметрів протоколу МД до функціонування в реальних умовах (блок 12) згідно процедур вказаних у [85] (етап оперативного управління).

Далі здійснюється перевірка наявності апаратного ресурсу (ТАП) (блок 13). У випадку наявності ($k < K$), переходимо на крок 1, інакше – КІНЕЦЬ роботи алгоритму.

Крок 8. Підвищення пропускну здатності мережі (блоки 10-14) шляхом виконання процедури 3 (загальний алгоритм показано на рис. 4.2):

1. Пошук нового рішення (топології із застосуванням поточного ТАП C_k^{t+1} , що забезпечує максимізацію ПЗ. Оскільки ця задача є NP - складною, то для зменшення складності пошуку можна застосувати сукупність правил, а також решітчасту або центроїдну ініціалізацію, які детально розглядаються далі.

2. Побудова маршрутних таблиць $\Pi_i(C_k^{t+1})$, які визначаються матрицею тяжіння та обраним методом маршрутизації. Перерозподіл потоків λ_{ij}

відповідно $P_i(C_k^{t+1})$. Проведення розрахунку параметрів $s(m_{ab}), \bar{t}_3(l(m_{ab}))$ для діючих пар відправник-одержувач.

3. Перевірка виконання умов Ω_2 для C_k^{t+1} . При невиконанні умов Ω_2 або при $S(C_k^{t+1}) < S(C_k^t)$ відкинути C_k^t , в іншому випадку $C_k^t = C_k^{t+1}$ виконується вивід ТАП у задане положення (етап розгортання) і адаптація параметрів протоколу МД до функціонування в реальних умов (етап оперативного управління) згідно процедур вказаних у [85].

4. Перевірка на наявність апаратного ресурсу (ТАП). У випадку наявності ($k < K$), переходимо на крок 1, інакше – КІНЕЦЬ.

При виведенні усіх ТАП кожним з них на етапі оперативного управління періодично здійснюється відпрацювання розглянутої вище схеми з метою перевірки необхідності зміни свого положення у просторі (при цьому усі вузли МБСМ із ТАП вважаються фіксованими у заданий момент часу). При цьому час відпрацювання методу управління має бути достатнім, щоб побудувати маршрути в МБСМ із ТАП і передати по ним мінімальну кількість даних, і одночасно таким, щоб топологія МБСМ із ТАП суттєво не змінилася.

Частота відпрацювання запропонованого методу визначається за результатом прогнозування тривалості зв'язності на основі використання моделей переміщення МСВ, що розглядаються в розділі 2. Припускається також, що за час збору вихідних даних про стан мережі, виконання розрахунків та виведення ТАП у задане положення у просторі, топологія мережі значно не зміниться.

4.3 Удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП

Задача пошуку матриці зв'язності C_k (оптимального положення ТАП) в (4.2) відноситься до класу *NP*-повних. Використання класичних методів для

її рішення приводить до експонентної складності. Точне рішення для МБСМ із ТАП з сотнями (тисячами) МСВ, вимагає значних затрат часу. Для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП запропоновано використовувати сукупність правил, що поєднані в базу знань, які змінюють зв'язність мережі МБСМ із ТАП для підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП та скорочують час обчислень. Це сприяє отриманню в реальному часі близьких до оптимальних (квазіоптимальні) рішення і використанню запропонованого алгоритму для оперативного управління положенням ТАП. Критерієм визначення моменту зміни топології МБСМ із ТАП може бути не виконання умов Ω_1 або Ω_2 [3].

Використання сукупності правил включає в себе ітераційну процедуру, яка включає модулі АНАЛІЗ, БАЗА ЗНАНЬ, УПРАВЛІННЯ (рис. 4.4).

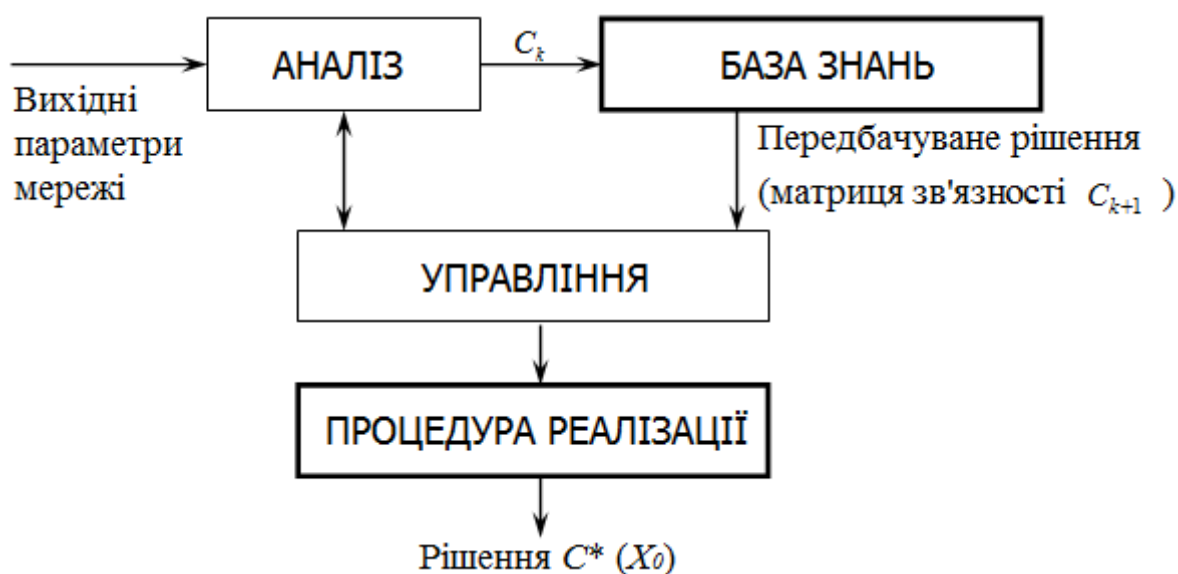


Рисунок 4.4 - Схема удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП із використанням сукупності правил

Ітераційна процедура працює у наступній послідовності [3]:

1. Аналіз поточного стану МБСМ із ТАП (розрахунок параметрів МБСМ із ТАП за допомогою ідентифікованих математичних моделей.

2. Перевірка параметрів МБСМ із ТАП на множині правил. Якщо умови для виконання правил відсутні, то процедуру необхідно закінчити, в іншому випадку для зміни зв'язності мережі застосувати правила з бази знань.

3. Визначення параметрів модифікованої МБСМ із ТАП.

Якщо параметри МБСМ із ТАП покращились, то здійснити перехід до кроку 2, інакше – відмінити останню зміну зв'язності і здійснити перехід до кроку 2.

Модуль АНАЛІЗ призначено для знаходження за допомогою математичних моделей розділу 3 пропускної здатності S МБСМ із ТАП, середньої затримки передачі пакетів по маршрутах t_3 при заданих зв'язності C , вхідному навантаженні G , маршрутних рішеннях P та заданому протоколі МД.

Модуль БАЗА ЗНАНЬ включає в себе правила, які забезпечують пошук зміни зв'язності, використовуючи параметри, що були отримані з модулю АНАЛІЗ. До складу правил продукційного типу входять компоненти умова та дія [89]. Умова визначає можливість використання правила у кількісному виразі, а дія застосовується для задоволення умови та описує зміну зв'язності МБСМ із ТАП, що призводить до користувальницької або системної оптимізації:

$$\text{Пр}_i: \alpha_i \rightarrow \beta_i ,$$

де Пр_i – i -е правило; α_i – i -я умова; β_i – i -я управлінська дія.

Управлінська дія у цьому випадку передбачає розміщення одного (або декількох) ТАП у певних точках простору. Початкове розміщення ТАП в залежності від обраної цілі управління (правила) може бути визначено центроїдним або решітчастим способом ініціалізації, або їх модифікаціями, що буде показано далі.

Модуль УПРАВЛІННЯ виконує роль інтерпретатора. Він визначає момент закінчення застосування правил [89] працюючи циклічно. В кожному циклі він перевіряє всі правила, для виявлення правил, посилки яких

співпадають із фактами з пам'яті, відомими на даний момент. Якщо після вибору правило спрацює, то його висновок вноситься у пам'ять. Далі цикл повторюється спочатку, при цьому в одному циклі спрацювати може тільки одне правило. У випадку, коли декілька правил успішно співставленні з фактами, то інтерпретатор, використовуючи мета правила, вибирає з них одне правило. В залежності від k -ї цілі управління ($\text{МПр}_i: \text{Пр}_i \rightarrow w_i^k$) перевагу правил визначають метаправила. Більшу вагу w_i^k буде мати те правило, що в більшій степені покращує необхідні параметри. [3]

Головною особливістю запропонованої процедури є сукупність правил, які класифіковано на три наступні групи: 1) правила, що забезпечують вимоги до зв'язності мережі (Ω_1); 2) правила, що забезпечують вимоги до функціональних показників (Ω_2); 3) правила, що забезпечують підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП. Параметром управління є положення ТАП відносно МСВ. Запропоновані правила аналізують структуру графа МБСМ із ТАП, намагаються виявити перевантажені ділянки мережі, перенаправити потоки по маршрутам з меншим навантаженням і створити таку структуру МБСМ із ТАП, що буде мати найбільшу пропускну здатність. Незалежно від цілей управління всі правила визначають наступну дію – вивід ТАП або зміну її позиції у просторі, що призводить до зміни кількості МСВ у зоні покриття ТАП [3].

В результаті експериментальних досліджень структури МБСМ із ТАП та застосування теорії графів були отримані структурні правила [90]. На основі цих правил розроблено декілька нових модифікованих правил та відповідних управлінських дій (що стосуються квазіоптимального розміщення ТАП у просторі):

Правило №1. Якщо кількість МСВ, що потрапляють в зону покриття ТАП, переважає задану (визначається створюваним ними навантаженням), тоді зменшити потужність ТАП (радіус зони радіопокриття R) для покриття оптимальної кількості МСВ.

$$N_k \leq N_k^0$$

Мета-правило №1. Якщо існує декілька способів розміщення ТАП, що поєднує однакову кількість вузлів (компонент зв'язності), то обрати той, що має кількість «сусідів-ТАП» не більше заданої.

$$M_k \leq 5,1774 \log K \quad [60]$$

Процедура реалізації цього правила може мати наступні кроки:

Крок 1. Решітчаста ініціалізація. Розрахунок кількості покриваємих МСВ для кожного перетину решітки. Перевірка умови покриття заданої кількості МСВ. При наявності декількох однакових варіантів – застосування мета-правила 1.

Крок 2. Застосування управління потужністю для покриття заданої кількості МСВ.

Крок 3. Перевірка та забезпечення зв'язності мережі за рахунок побудови МКД.

Загальна схема модифікованого правила наведена на рис. 4.5

Цикл управління топологією (місцеположенням) мережі ТАП складається з наступних кроків:

Крок 1: Збір інформації про початкову топологію МБСМ із ТАП та ввід вихідних даних:

N – кількість МСВ в мережі.

K – кількість ТАП.

N_K^o – допустима кількість МСВ, яку може покрити один ТАП.

M_K^o – допустима кількість ТАП, які працюють на одній частоті.

$R_K^{f_1}$ – радіус дії (область зони покриття) одного ТАП на частоті f_1 для покриття МСВ.

$R_K^{f_2}$ – радіус дії (область зони покриття) одного ТАП на частоті f_2 для взаємодії із «сусідами -ТАП-ретрансляторами»

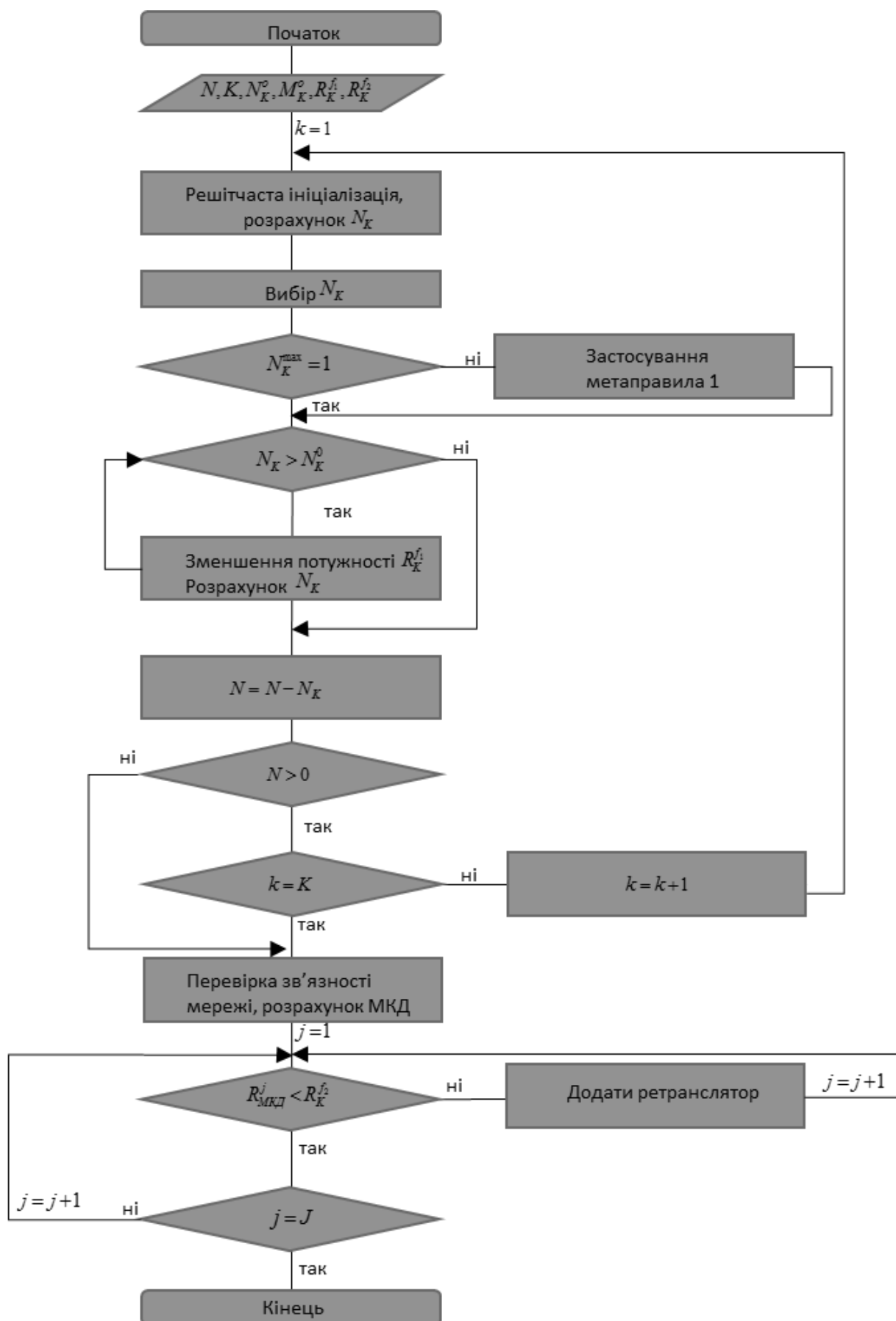


Рисунок 4.5 - Схема-алгоритм управління положенням ТАП-ретрансляторів

Крок 2: Виконання процедури ініціалізації, тобто ТАП починає «сканувати» все сенсорне поле і рахує де є найбільше скупчення МСВ, які можна покрити. Якщо таких місць є декілька і там знаходиться однакова кількість МСВ N_K , то виконується застосування метаправила 1. В іншому випадку ТАП починає рахувати кількість МСВ, які входять в його радіус покриття. Якщо кількість МСВ N_K більша, ніж допустима N_K^O (N_K^O може бути різною і залежить від навантаження, яке створюють МСВ), то ТАП починає зменшувати свою потужність, тобто радіус свого покриття. Після чого знову відбувається перерахунок кількості N_K і так відбуватиметься до того часу, поки N_K не перевищуватиме N_K^O .

Крок 3: Виконання процедури перевірки кількості МСВ, які ще залишилися не покритими. Якщо всі МСВ уже покриті, то відбувається перехід до *Кроку 4*. В протилежному випадку починається перевірка наявності вільних ТАП, обирається новий ТАП-ретранслятор і відбувається перехід до *Кроку 1*.

Крок 4: Виконується перевірка зв'язності мережі шляхом побудови мінімального кістякового дерева (МКД) за алгоритмом Прима. Якщо радіус дії ТАП-ретранслятора $R_K^{f_2}$ менший, ніж вага якогось ребра (відстань ребра) із побудованого МКД $R_{МКД}^j$, то між ними буде розміщуватись ще один додатковий ТАП-ретранслятор, який працюватиме на частоті f_2 і слугуватиме лише для взаємодії ТАП-ретрансляторів.

МКД зв'язаного, зваженого неорієнтованого графу – це кістякове дерево цього графу, що має мінімальну можливу вагу, де під вагою дерева розуміють суму ваг його вхідних ребер. В загальному випадку, задачу побудови МКД можна сформулювати наступним чином: маємо зв'язний, неорієнтований граф $G(V, E)$ з вагами на ребрах, де V – множина вершин (контактів) графу, а E – множина усіх можливих попарних з'єднань (ребер) в

графі. Припустимо, що для кожного ребра (U, V) однозначно визначено деяке дійсне число $W(u, v)$, що визначає його вагу (довжину або вартість з'єднання). Число W називають ваговою функцією. Необхідно знайти такий зв'язний ациклічний граф $T \subset G$, що містить усі вершини, у яких сумарна вага ребер буде мати мінімальне значення.

Мінімальне кістякова дерево можна знайти, використовуючи алгоритм Прима. Алгоритм Прима – це алгоритм, що використовується для побудови мінімального кістякового дерева (МКД) зваженого зв'язного неорієнтованого графа. Він відноситься до жадібних алгоритмів (тобто простих і прямолінійних евристичних алгоритмів, які приймають найкращі рішення, використовую наявні на поточному етапі дані, не турбуючись про можливі наслідки і сподіваючись врешті-решт отримати оптимальне рішення.).

Побудова МКД починається з дерева, що має одну (довільну) вершину. Протягом роботи алгоритму дерево збільшується, поки не охопить всі вершини вихідного графу. На кожному кроці виконання алгоритму до поточного дерева приєднується ребро, що має найменшу вартість та з'єднує вершину з побудованого дерева та вершину, що не належить дереву.

Алгоритм Прима виконується в наступній послідовності:

- 1.Спочатку ребра графу сортують за зростанням ваги.
- 2.Далі додається в дерево найменше ребро.
- 3.Зі списку ребер, що мають найменшу вагу вибирають нове ребро так, щоб одна з його вершин належала дереву, а інша вершина — ні.
- 4.Це ребро додається у дерево і знову здійснюється перехід до кроку 3.
- 5.Робота алгоритму закінчується, коли всі вершини будуть у МКД.

Розглянемо приклад знаходження МКД з алгоритмом Прима:

1. На рис. 4.6 показано вихідний зважений граф. Числа біля ребер графу показують їх ваги, які можна вважати відстанями між вершинами.

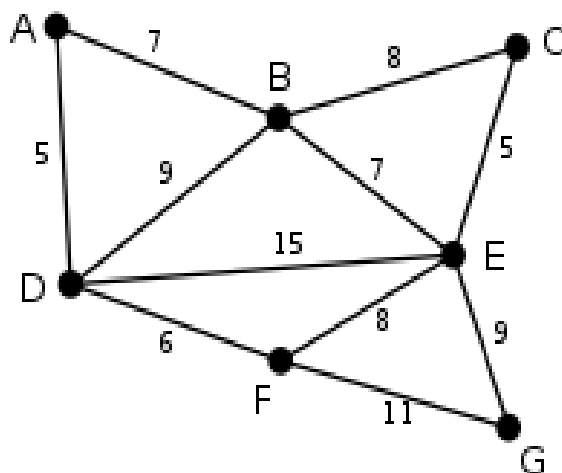


Рисунок 4.6 - Вихідний зважений граф

2. В якості початкової довільно виберемо вершину D. Вершини графу A, B, E і F з'єднані кожна з D одним ребром. Вершина A - найближча до вершини D, і вибирається як друга вершина графу разом з ребром AD (рис. 4.7).

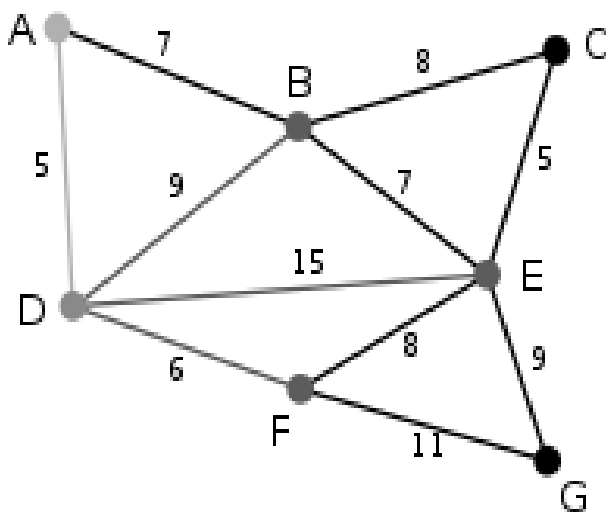


Рисунок 4.7 - Вихідний зважений граф з початковою вершиною D і другою вершиною A

3. Наступною вершиною буде найближча до будь-якої з обраних вершин A або D. Вершина B віддалена від D на 9 одиниць і від A - на 7 одиниць. Відстань до вершини E дорівнює 15 одиниць, а до вершини F – 6 одиниць. Вершина F є найближчою вершиною (рис.3.8), тому її включаємо в дерево разом з ребром DF.

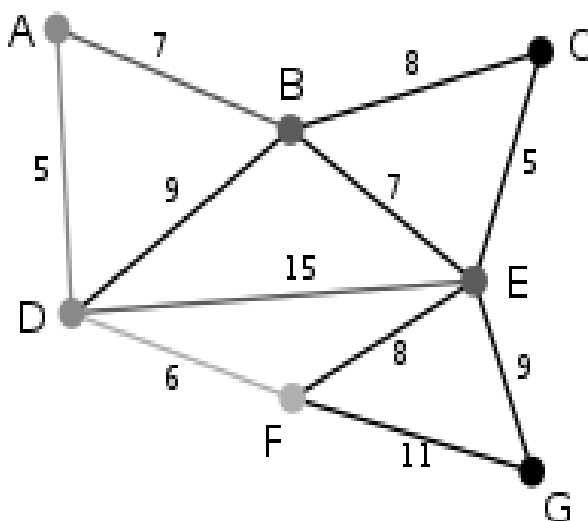


Рисунок 4.8 - Зважений граф з включеною вершиною F

4. На наступному кроці є можливість вибрати або вершину C, або вершину E, або вершину G. Вершина C віддалена від вершини B на 8 одиниць, вершина E віддалена від вершини B на 7 одиниць, а вершина G віддалена від вершини F на 11 одиниць. Вершина E - найближча вершина (рис.3.9), тому вибирається вершина E і ребро BE (рис. 4.9).

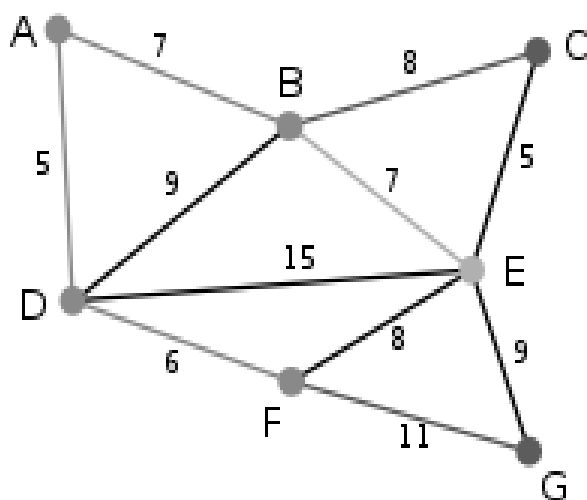


Рисунок 4.9 - Зважений граф з включеною вершиною E (ребро BE)

5.Єдина вершина, що залишилася – це вершина G. Відстань від вершини F до неї 11 одиниць, від вершини E – 9 одиниць. Вершина E ближче, тому вибираємо вершину G і ребро EG (Рис. 4.10).

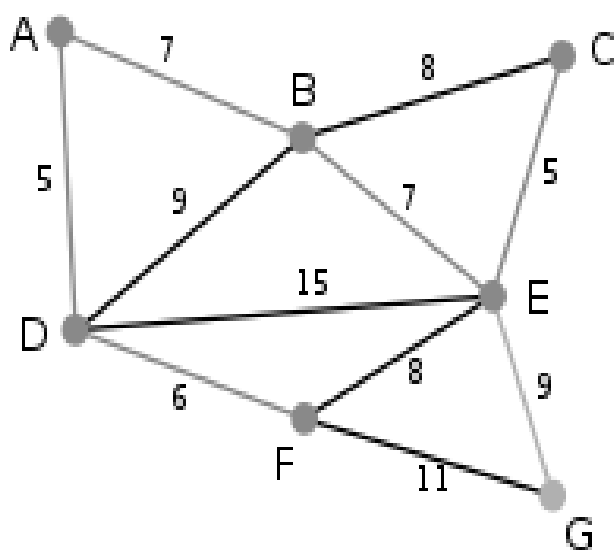


Рисунок 4.10 - Зважений граф з включеною вершиною G (ребро EG)

6.Вибрані всі вершини графу, МКД побудовано (Рис. 4.11)

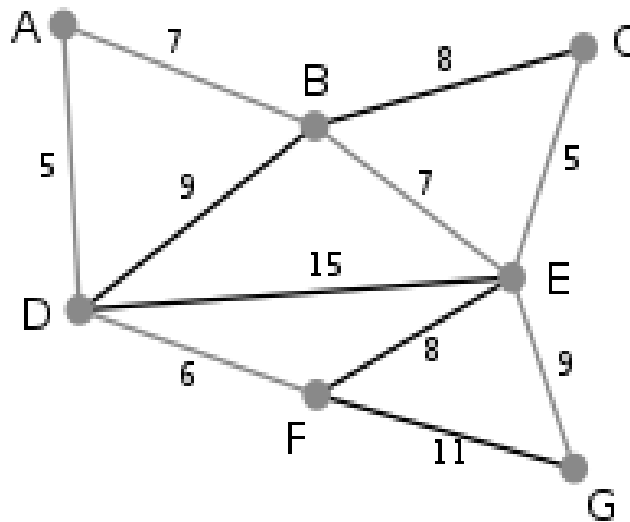


Рисунок 4.11 - Мінімальне кістякове дерево

Правило № 2. Якщо середня затримка передачі повідомлень (кількість ретрансляцій) в певному маршруті (маршрутах) більше необхідної, тоді необхідно знайти таке положення ТАП, при якому середня затримка передачі повідомлень (кількість ретрансляцій) в маршруті була зменшена. [3]

Мета-правило №2. Якщо існує декілька способів розміщення ТАП, при яких однаково зменшується затримка в маршрутах, тоді слід обрати той варіант, що дозволяє максимізувати пропускну здатність маршрутів. [3]

Щоб зменшити середню затримку передачі повідомлень (кількість ретрансляцій в маршруті) ТАП необхідно розмістити так, щоб покрити пару заданих МСВ відправник-отримувач або ж пару найбільш віддалених (по кількості ретрансляцій) МСВ. [3]

Для цього пропонується застосовувати наступну процедуру, засновану на центроїдній ініціалізації (рис. 4.12):

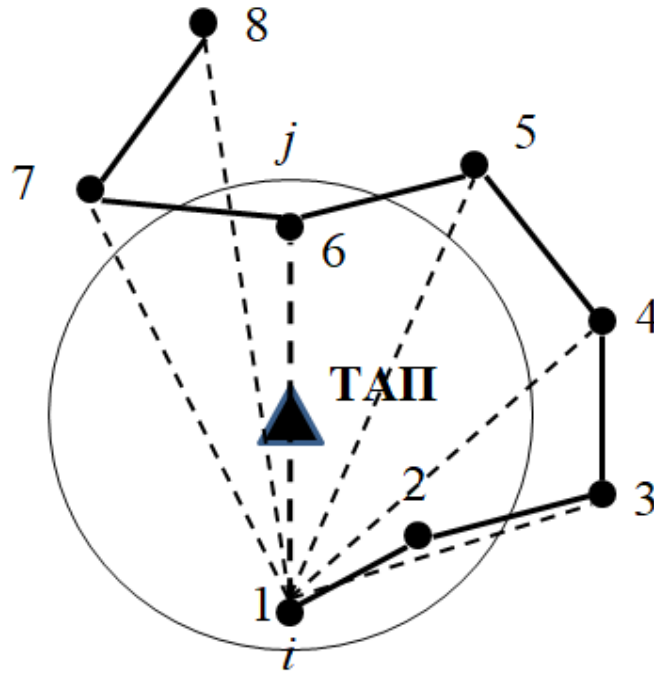


Рисунок 4.12 - Реалізація правила №2 із використанням центроїдної ініціалізації

1. Визначити «проблемні» маршрути (маршрут) m_{ab} МБСМ із ТАП, для яких не виконується умова $\overline{t_3} \leq t_3^0$ ($l(m_{ab}) \leq l^0$), визначити кількість ретрансляцій $l^0 = N - 1$ в кожному «проблемному» маршруті, де N – кількість вузлів в маршруті.

2. З'єднати заданий вузол i (наприклад, $i=1$ на рис. 4.12) зі всіма іншими вузлами j «проблемного» маршруту прямими відрізками.

3. Перевірити можливість покриття зоною обслуговування ТАП радіусу R кожного відрізка ij : $r_{ij} \leq 2R$ (при розміщенні ТАП в центрі кожного відрізка).

4. Для тих відрізків, для яких виконується попередня умова, розрахувати по наступній формулі нову кількість ретрансляцій маршруту із використанням ТАП:

$$l_{ij}(m_{ab}) = \begin{cases} |N - j| + |1 - i| + 2, & i < j \\ |N - i| + |1 - j| + 2, & i > j \end{cases}, \quad a, b, i, j = \overline{1, N} \quad (4.3)$$

5. Вибрати серед усіх можливих той відрізок, для якого розміщення у його центрі ТАП дозволяє максимально зменшити кількість ретрансляцій в маршруті.

Обчислювальна складність запропонованої процедури складатиме $O(N^2)$.

При використанні наведеної вище процедури для прикладу, наведеному на рис. 4.12, ТАП буде розміщено в центрі відрізка 1-6, що дозволить створити новий маршрут 1-ТАП-6-7-8, який включає 4 ретрансляції замість 7 при відсутності ТАП (маршрут 1-2-3...6-7-8).

У випадку, якщо існує декілька рішень (щодо розміщення ТАП) з однаковою кількістю ретрансляцій в маршруті, можна застосовувати додаткові метаправила, спрямовані, наприклад, на підвищення пропускної здатності маршруту МБСМ із ТАП.

Правило №3. *Якщо необхідно підвищити пропускну здатність МБСМ із ТАП, то ТАП необхідно розмістити так, щоб покрити максимальну кількість перевантажених МСВ МБСМ із ТАП.*

МСВ можуть бути перевантаженими, у випадку, коли постійно зростає черга в буфері МСВ через велику інтенсивність надходження пакетів на обслуговування, або у випадку зростання кількості колізій при організації МД через велике скупчення МСВ. Будемо вважати МСВ перевантаженими, якщо пропускна здатність каналів, інцидентних з ними, не відповідає умові $s(m_{ab}) \geq 0,5$. Розміщення ТАП над скупченням перевантажених МСВ (рис. 4.13) дозволить організувати нові маршрути передачі даних між ними (за допомогою одного з відомих методів маршрутизації), збалансувати навантаження в МБСМ із ТАП та підвищити її пропускну здатність.

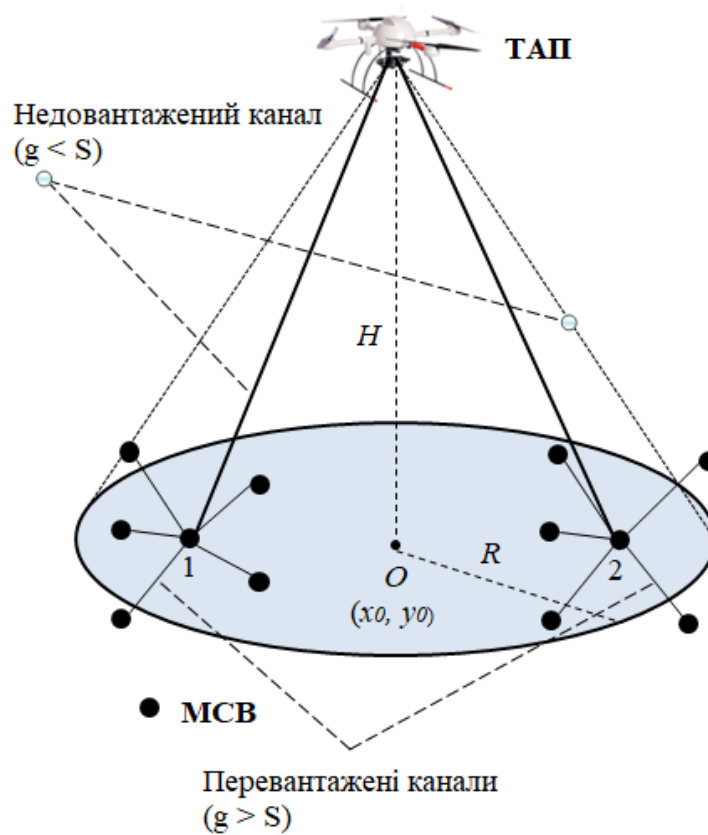


Рисунок 4.13 – Приклад застосування правила №3

Для реалізації цього правила використаємо решітчасту ініціалізацію у поєднанні з центроїдною ініціалізацією в наступній послідовності:

1. Пошук максимальної кількості перевантажених МСВ здійснюється відповідно до решітчастої ініціалізації.

2. Пошук квазіоптимального положення ТАП здійснюється в центрі мас перевантажених МСВ відповідно до центроїдної ініціалізації. Центр мас групи перевантажених МСВ можна визначити за наступною формулою:

$$x_{0k} = \sum_{i=1}^{N^{nep}} \alpha_i x_i, \quad y_{0k} = \sum_{i=1}^{N^{nep}} \alpha_i y_i, \quad (4.4)$$

де $\alpha_i = 1/N^{nep}$, N^{nep} - кількість вузлів групи перевантажених МСВ.

Також зазначимо, що $\sum_{i=1}^{N^{np}} \alpha_i = 1$.

4.4 Оцінка ефективності запропонованого методу

Моделювання функціонування МБСМ із ТАП здійснювалося на базі комп'ютерних середовищ Microsoft Excel і Maple. Застосовувалися наступні вихідні дані: $N=165$ – кількість МСВ; $K=5$ – кількість ТАП; $r=10000 \times 10000 \text{ м}^2$ – розмір району розміщення МСВ; $d^0=600 \text{ м}$ – максимальна дальність зв'язку МСВ-МСВ; $R'=1500 \text{ м}$ – максимальна дальність зв'язку МСВ-ТАП; алгоритм пошуку найкоротших шляхів – Дейкстри; $L=1024$ біт – довжина пакету; $V=11 \text{ Мбіт/с}$ – швидкість передачі; $v_i=15 \text{ м/с}$, $i=\overline{1, N}$ – середня швидкість переміщення МСВ. Інші вихідні данні повторюють дані з попередніх розділів.

Для оцінки ефективності запропонованого методу розглянемо наступні стратегії управління (СУ) положенням ТАП:

1. Базова стратегія управління (СУ1) з покриттям максимальної кількості МСВ.
2. Стратегія управління з використанням методу повного перебору (СУ2).
3. Стратегія управління на основі запропонованих правил (СУ3) з покриттям максимальної кількості перевантажених вузлів.

Оцінку запропонованого методу виконаємо в наступному порядку:

1. Задання топології МБСМ із ТАП випадковим чином та розміщення ТАП відповідно СУ1, СУ2 та СУ3 (рис. 4.14).
2. Розрахунок пропускної здатності $S(C)$ МБСМ із ТАП для кожної СУ. Визначення виграшу стратегій СУ2 і СУ3 по відношенню до СУ1 та достовірності результатів кожної СУ відносно методу повного перебору (рис. 4.15 – рис. 4.16).
3. Розрахунок часу пошуку рішення для методу повного перебору (СУ2) і запропонованого методу (СУ3) та порівняння значень із тривалістю зв'язності МСВ.

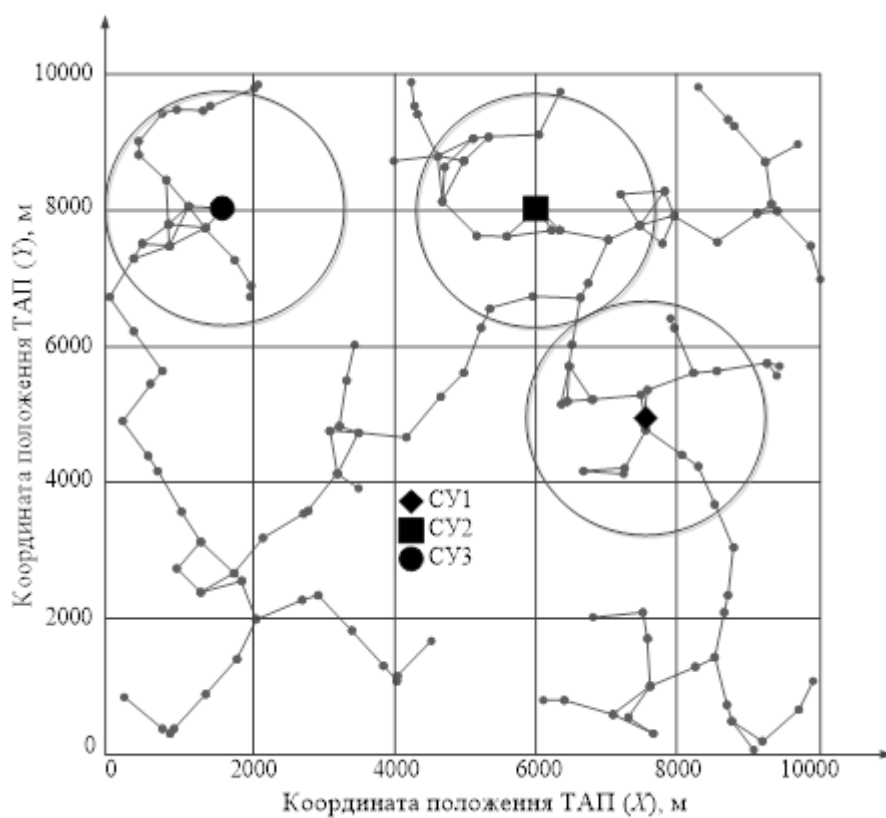


Рисунок 4.14 - Початкова топологія МБСМ із розміщенням ТАП для СУ1, СУ2 і СУ3

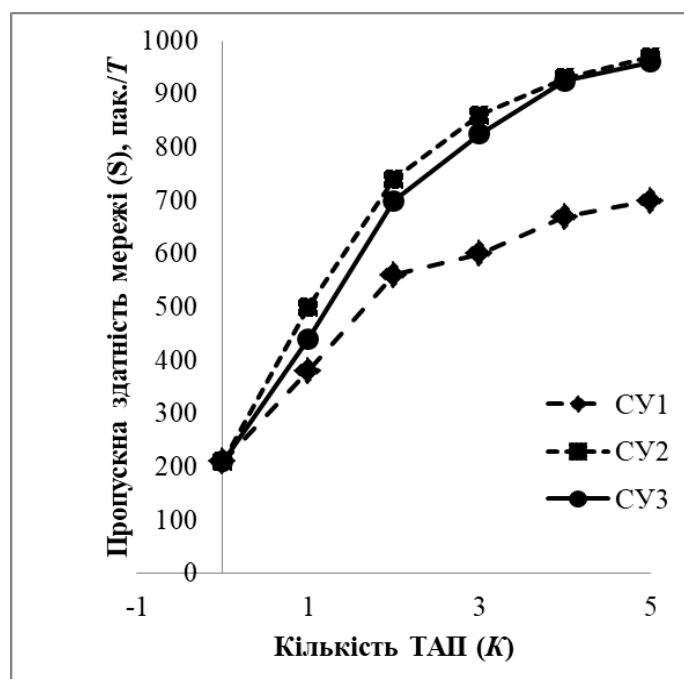


Рисунок 4.15 - Залежність ПЗ МБСМ із ТАП від кількості виведених ТАП для СУ1, СУ2, СУ3

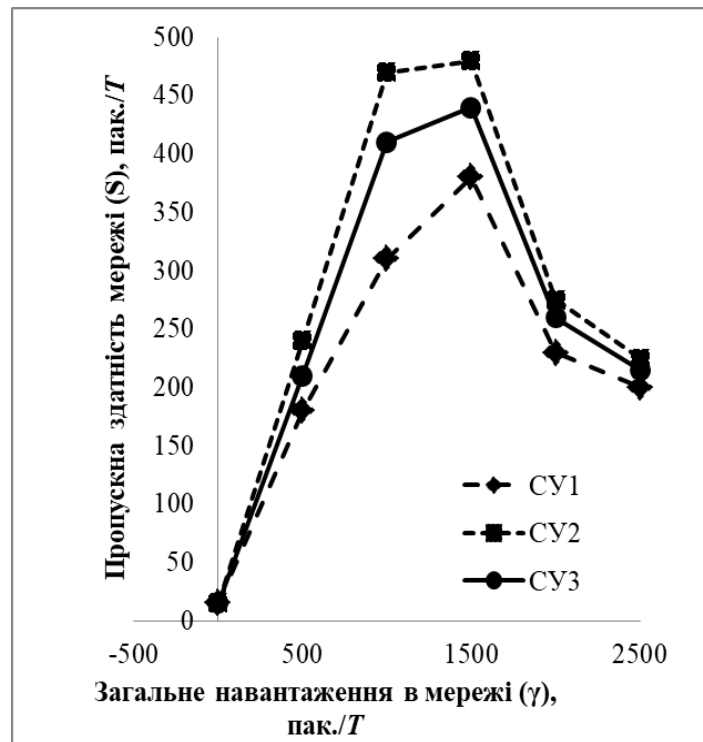


Рисунок 4.16 - Залежність ПЗ МБСМ із ТАП від загального навантаження при різних стратегіях управління положенням ТАП

Аналіз графіків залежності пропускної здатності МБСМ із ТАП від загального навантаження при різних стратегіях управління показує, що в діапазоні трафіку від 600 до 1500 пакетів стратегія управління положенням ТАП (CY3) значно переважають базову стратегію (CY1) впродовж нормованого часу передачі пакету T . В інших діапазонах трафіку усі СУ майже однаково неефективні.

Таким чином оцінка ефективності запропонованого методу показує наступне:

1. Виграш запропонованого методу (CY3) відносно базової стратегії (CY1) при генерації 100 початкових випадкових топологій становить в середньому 10-12%.
2. Відхилення значення пропускної здатності в запропонованому методі (CY3) від пропускної здатності в методі повного перебору (CY2) становить в середньому 5-7%.

3. При середній тривалості зв'язності між МСВ 350с час отримання рішення для запропонованого методу (СУ3) становить в середньому 24с, що дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу на відміну від методу повного перебору (СУ2), для якого час отримання рішення становить десятки хвилин.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Розроблено метод підвищення пропускної здатності МБСМ з управлінням положенням ТАП. Суть розробленого методу полягає в побудові спеціальної обчислювальної структури на основі математичних моделей оцінки структурної зв'язності МСВ, математичних моделей оцінки показників якості обслуговування МСВ і удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП та об'єднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення в режимі реального часу значень пропускної здатності МБСМ із ТАП, близьких до екстремальних [3].

2. Задача пошуку матриці зв'язності C_k (оптимального розміщення ТАП) відноситься до класу *NP*-повних. Використання класичних методів для її рішення приводить до експонентної складності. Точне рішення для МБСМ із ТАП з сотнями (тисячами) МСВ, вимагає значних затрат часу. Для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП запропоновано використовувати сукупність правил, що поєднані в базу знань, які змінюють зв'язність мережі МБСМ із ТАП для підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП та скорочують час обчислень. Це сприяє отриманню в реальному часі близьких до оптимальних (квазіоптимальні) рішення і використанню запропонованого алгоритму для оперативного управління положенням ТАП [3].

3. Проведена оцінка ефективності запропонованого методу. Показано, що вигреш запропонованого методу (відносно базової стратегії) становить в

середньому 10-12%. При цьому відхилення значень пропускної здатності МБСМ із ТАП відносно методу повного перебору становить в середньому 5-7%. Час отримання рішення із використанням сукупності правил становить в середньому 24с, що при середній тривалості зв'язності між МСВ 350 с дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу на відміну від методу повного перебору, для якого час отримання рішення становить десяткі хвилин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача - розробка методу підвищення пропускної здатності МБСМ із ТАП в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення МСВ.

Головні наукові і практичні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності мобільних сенсорних вузлів мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами. Суть удосконалення моделі оцінки зв'язності, що визначає її новизну, полягає в тому, що вперше запропоновано поєднати аналітичні моделі оцінки достовірності передачі повідомлень в радіоканалах із аналітичними моделями прогнозування переміщення мобільних сенсорних вузлів. Показано, що при заданих вимогах до роботи протоколу МД максимальна дальність зв'язності становить близько 600м для каналу МСВ-МСВ та близько 3000м для каналу МСВ-ТАП. На основі розроблених математичних моделей переміщення МСВ було досліджено тривалість безпосередньої зв'язності вузлів МБСМ із ТАП. Так тривалість з'єднання «ТАП - «МСВ пішохід» становитиме в найгіршому випадку в середньому 36 хвилин, а з'єднання «ТАП-МСВ транспортний засіб» в середньому 5 хвилин, що дозволяє на практиці прогнозувати час перебування МСВ в зоні радіопокриття ТАП та визначати частоту зміни у просторі положення ТАП.

2. Досліджено математичні моделі оцінки функціональних показників мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами, які ґрунтуються на детальному розрахунку трафіку і вточнених аналітичних співвідношеннях для оцінки середньої затримки передачі повідомлень та пропускної здатності мережі. Показано, що канали зв'язку із ТАП за рахунок дуплексної організації мають на 15% більшу пропускну здатність ніж канали МСВ-МСВ при однаковому навантаженні. Для зменшення затримки передачі в маршрутах також доцільно передавати

інформацію через мережу ТАП. При цьому всередині стільника доцільно ретранслювати пакети при кількості ланок в маршруті більше ніж 3, а по міжплатформним лініям зв'язку – більше ніж 4. Це можна бути використане при пошуку найкоротшого маршруту між заданою парою відправник-отримувач.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення ТАП.

Суть удосконалення алгоритму полягає в тому, що для пошуку квазіоптимального положення ТАП вперше було запропоновано використовувати попередньо розроблену сукупність правил відбору варіантів зміни зв'язності мережі, що підвищує її пропускну здатність і значно зменшує час обчислень (у порівнянні з часом обчислення методу повного перебору варіантів розміщення ТАП). Результати моделювання свідчать, що час отримання рішення із застосуванням сукупності правил становить в середньому 24с, що при середній тривалості зв'язності між МСВ 350 с, дозволяє виконувати управління положенням ТАП в режимі реального часу на відміну від методу повного перебору, для якого час отримання рішення становить десятки хвилин. Відхилення рішень квазіоптимальних варіантів розміщення телекомунікаційних аероплатформ від оптимальних, отриманих за допомогою методу повного перебору, не перевищує 5-7%.

4. Розроблено метод підвищення пропускну здатності МБСМ на основі використання ТАП. Відмінність розробленого методу від відомих методів полягає в тому, що вперше побудовано спеціальну обчислювальну структуру на основі математичних моделей оцінки структурної зв'язності МСВ, математичних моделей оцінки показників якості обслуговування МСВ і удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП та запропоновано об'єднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення в режимі реального часу значень пропускну здатності МБСМ із ТАП, близьких до екстремальних. Виграш від застосування запропонованого методу становить в середньому 10-12% відносно базової стратегії управління положенням ТАП.

Наукові результати, отримані в дисертації можуть бути використані при розробці сучасних систем управління МБСМ із застосуванням ТАП та підвищенні ефективності їх функціонування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, П.І. Кірчу, О.М. Тачиніна, В.І. Новіков. – К.: НАУ, 2016. – С.332.
2. Tachinina, O. Mathematical Modeling of Motion of Iron Bird Target Node of Security Data Management System Sensors / O. Tachinina, O. Lysenko, I. Alekseeva, V. Novikov // CEUR Workshop Proceedings, 2020. Vol-2711, pp. 482-491.
3. Новіков В. І. Математичні моделі, методи і алгоритми оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 3 2020 Частина 1. – С. 54 – 64.
4. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами [Текст] / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи, 2017, № 2. С. 15-23.
5. Лисенко О. І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища [Текст] / О. І. Лисенко, К. С. Козелкова, В. І. Новіков, Т. О. Прищепа, А. В. Романюк // Системи обробки інформації. - 2015. - Вип. 10. - С. 222-225.
6. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Система стабілізації безпілотного літального апарата на траєкторіях баражування; № 112657 дата 10.10.2016.

7. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 110683 дата 25.01.2016.
8. Патент України на корисну модель; Назва охоронного документу - Спосіб безперервної аеропросторової ретрансляції пошуково-рятувальної інформації в умовах ліквідації наслідків надзвичайної ситуації; № 99483 дата 10.06.2015.
9. Valuiskyi S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuiskyi, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. С. 72–75.
10. Kashuba S. Hybrid Localization Method for Sensor Networks with Low Nodes Density / S. Kashuba, B. Trach, V. Novikov, T. Pryshchepa // 4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016), October 18-20, 2016. С. 76–79.
11. Kashuba, S. V. Optimization of UAV Path for Wireless Sensor Network Data Gathering / S. V. Kashuba, V. I. Novikov, O. I. Lysenko, and I. V. Alekseeva // 2015 IEEE 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Proceedings. – 2015. - С. 280 – 283.
12. Lysenko A.I. Analysis of options for construction of the satellite sensor systems / A.I. Lysenko, S.V Kashuba, T.A. Prishchepa, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, S.V. Karmazyn // Usporiadatel' medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. С. 346-351.

13. Lysenko A.I. Improving efficiency wireless sensor networks with satellite information transmission channels / A.I. Lysenko, S.V. Kashuba, T.A. Prishepa, V.I. Novikov, S.N. Chumachenko, O.P. Kutovyi // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany*. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 352-357.
14. Lysenko A.I. Investigation of possible application of the protocol bfd to improving the reliability of wireless sensor networks / A.I. Lysenko, B.V. Trach V.I., T.A. Prishepa, V.I. Novikov, I.V. Uriadnikova, A.N. Teslenko // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany*. 22-23.10.2015, Liptovský Mikuláš, Slovakia. C. 358-363.
15. Lysenko O. Method of sensors location in the area of emergency based on compound dynamic system technology / O. Lysenko, V. Novikov, T. Prischepa, H. Tachinina, I. Uriadnikova // *International Scientific Conference COMPLEX SYSTEMS SECURITY MANAGEMENT 2015* (23. - 27. februara 2015), Liptovský Mikuláš, Slovakia. pp. 226-231.
16. Новіков В.І. Аналітична модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах завмирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів/ В.І. Новіков // *XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.34-37.
17. Новіков В.І. Розвиток енергозберігаючого методу моніторингу цілей у зонах спостереження безпроводових сенсорних мереж/ В.І. Новіков, М.К. Спаравало, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва // *XIV Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2020: Збірник матеріалів конференції*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С.301-303.

- 18.Новіков В.І. Підхід до побудови системи моніторингу цілей на основі застосування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // Проблеми інформатизації: Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Київ: ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ; Білорусь: БДАЗ; Кропивницький: ЛА НАУ, 2019. – С.199.
- 19.Лисенко О. І. Метод підвищення ефективності безпроводових сенсорних мереж екологічного моніторингу, побудованих на радіогідроакустичних буях / О.І.Лисенко, В.І. Новіков, В.М.Петрова // Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація. Матеріали науково-практичного семінару. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2019. – С.95 - 97.
20. Новіков В. І. Алгоритм мінімізації витрат енергоресурсу безпроводової сенсорної мережі / В. І. Новіков, О. І. Лисенко, С. М. Чумаченко, І. М. Давидов // Матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 7–8 лютого 2019 р. (Краків, Польща). – К. : НУХТ, 2019. – С.10 - 14.
21. Новіков В.І. Метрика вартості з'єднання для маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В.І. Новіков // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» ПТ-2019: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С.67-70.
- 22.Лисенко О.І. Енергозберігаюча топологія для безпроводової сенсорної мережі моніторингу цілей / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // Проблеми інформатизації: Матеріали дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Київ : ДУТ, НТУ; Полтава: ПНТУ; Катовице: КЕУ; Париж: Університет Париж VII Венсент-Сен-Дені; Вільнюс: ВДТУ; Харків : ХНДІТМ; Білорусь: БДАЗ, 2018. – С.123-124.

23. Романюк В.А. Система управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // XI Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С.28-32.
24. Новіков В.І. Метод адаптивного управління маршрутизацією в умовах нестабільності зв'язей между узлами безпроводної сенсорної мережі / В.І. Новіков, А.І. Лисенко // X Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2016: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С.447-449.
25. Новіков В.І. Розвиток методу підвищення часу функціонування безпроводових сенсорних мереж / В.І. Новіков, О.І. Лисенко // IX Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2015: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2015. – С.354-356.
26. Лисенко О.І. Актуальні наукові задачі розвитку безпроводових сенсорних мереж / О.І. Лисенко, В.І. Новіков // VII Міжнародна науково-технічна конференція «"Проблеми телекомунікацій"» ПТ-2013: Збірник матеріалів конференції. К.: НТУУ "КПІ", 2013. – С.227-229.
27. Новіков В. І. Методика синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі [Текст] / В.І. Новіков, О.І. Лисенко, О.М. Тачиніна, О.Г. Гуйда // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 4 2020. – С. 31 – 37.
28. Лисенко О.І. Процедура синтезу топології безпроводної сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів [Текст] / О.І. Лисенко, В.І. Новіков, В.М. Петрова, О.Г.

- Гуйда / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2018. Том 29 (68) № 6 2018 Частина 1. – С. 69 – 72.
- 29.Новиков В. И. Метод адаптивного управления маршрутизацией в условиях нестабильности связей между узлами беспроводной сенсорной сети. Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2015. – Вип.10. – С. 137-144.
30. Новіков В. І. Метрики вартості з'єднання та прогресу для вирішення завдань маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / В. І. Новіков // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 2. - С. 96-108.
31. Новіков В. І. Модель безпроводового каналу сенсорної мережі в умовах великомасштабних замирань і випадкового розкиду параметрів приймально-передавачів / В. І. Новіков // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2014. - Вип. 1. - С. 143-152.
- 32.Брагін А. С. Метод підвищення точності позиціонування мобільних абонентів / А. С. Брагін, В. І. Новіков, Т. А. Прищепа, Р. С. Понедільченко // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. - 2012. - Вип. 5. - С. 12-20.
- 33.Патент України на корисну модель № 130356 «Спосіб визначення координат сенсорів бездротової сенсорної мережі» Автори: Лисенко О.І., Цуканов О.Ф., Якорнов Є.А., Новіков В.І. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.12.2018.
- 34.Свідоцтво авторського права; Назва охоронного документу - Метод зниження енерговитрат польоту телекомунікаційної аероплатформи на базі безпілотного літального апарату; Науковий твір; № 3042 дата 22.07.2016

35. Патент України на винахід; Назва охоронного документу - Спосіб зниження енерговитрат польоту безпілотного літального апарата; № 109483 дата 25.08.2015
36. Elmasry G.F. Tactical wireless communication and networks: design concepts and challenges / George F. Elmasry. – UK: John Wiley and Sons Ltd, 2012. – 328 p.
37. Yong Zeng, Rui Zhang, Teng Joon Lim. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine, Vol. 54, no. 5, 2016.
38. Jawhar I. UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies / I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jarood // International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS): proceedings. –, 2015. – P. 697 – 694.
39. Романюк В.А. Літаючі самоорганізуючі радіомережі / В.А. Романюк, Є.О. Степаненко, І.В. Панченко, О.І. Восколович // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 1. – С. 104 – 114.
40. Романюк А. В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А. В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ – 2018. – № 1. – С. 90–99.
41. Sarmad Rashed and Mujdat Soyuturk Analyzing the Effects of UAV Mobility Patterns on Data Collection in Wireless Sensor Networks, Sensors 2017, 17(2), 413; <https://doi.org/10.3390/s17020413>
42. Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища [Текст]: звіт про НДР (заключ.) / КПІ ім. Ігоря Сікорського; кер. теми О. І. Лисенко; викон. : В. І. Новіков [та ін.]. № держреєстрації 0115U000269. Київ, 2016. – 283 с.
43. Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації [Текст]: звіт про НДР

- (ост.) / КПІ ім. Ігоря Сікорського; кер. теми Л. О. Уривський; викон. : В. І. Новіков [та ін.]. № держреєстрації 0117U004282. Київ, 2019. – 270 с.
44. Миночкин А. И. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2004. – № 2. – С. 46–50.
 45. Бунин С. Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью / С. Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Техника, 1989. – 223 с.
 46. Leung K. K. Outdoor IEEE 802.11 cellular networks: radio and MAC design, and their Performance / K. K. Leung, M. V. Clark, B. McNair, Z. Kostic, L. J. Cimini, J. H. Winters // IEEE Communications (ICC 2002) : International Conference, April 28 – May 2 2002 : proceedings. – New York, 2002. – Vol. 1. – P. 512–516.
 47. Chandrashekar K. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms / K. Chandrashekar, M. R. Dekhordi, J. S. Baras // IEEE MILCOM'04 : Military Communications Conference, October 31 – November 3 2004 : proceedings. – Monterey, 2004. – Vol. 3. – P. 1429–1436.
 48. Романюк В. А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий / В. А. Романюк // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62–68.
 49. Романов А. И. Телекоммуникационные сети и управление: Учебное пособие / А. И. Романов. – К.: Изд-во «Киевский университет», 2003. – 247 с.
 50. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83–90.
 51. Basu P. Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes / P. Basu, J. Redi, V. Shurbanov // IEEE

- MILCOM'04 : Military Communications Conference, October 31 – November 3 2004 : proceedings. – Monterey, 2004. – Vol. 3. – P. 1628–1634.
52. Миночкин А. И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53–58.
53. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений: алгоритмический аспект / В. Г. Тоценко. – К.: Наукова думка, 2002. – 381 с.
54. Ильченко М. Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ / М. Е. Ильченко, С. А. Кравчук. – К.: Наукова думка, 2008. – 580 с.
55. Han Z. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A. L. Swindlehurst, K. J. R. Liu // IEEE Wireless Communications and Networking : conference, April 3-6 2006 : proceedings. – Las Vegas, 2006. – P. 252–257.
56. Dousse O. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks / O. Dousse, P. Thiran, M. Hasler // IEEE INFOCOM'2002 : The 21st Annual Joint Conference, June 23-27 2002 : proceedings. – New York, 2002. – P. 1079–1088.
57. Gupta P. Critical power for asymptotic connectivity / P. Gupta, P. R. Kumar // Decision and control : 37th IEEE Conference, December 16-18 1998 : proceedings. – Tampa FL, 1998. – P. 1106–1110.
58. Miller L .E. Probability of a two-hop connection in a random mobile network / L .E. Miller // Information Sciences and Systems : conference, March 21-23 2001 : proceedings. – Baltimore MD, 2001. – P. 1381–1388.
59. Santi P. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks / P. Santi, D. M. Blough // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2003. – Vol. 2. – №1. – P. 25–39.

60. Xue F. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks / F. Xue, P. R. Kumar // ACM Wireless Network Journal. – 2004. – vol. 10. – №2. – P. 169–181.
61. Li N. Improving connectivity of wireless ad hoc networks / N. Li, J. C. Hou // Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous 2005) : 2nd Annual International Conference, July 17-21 2005 : proceedings. – San Diego, 2005. – P. 314–324.
62. Khuller S. Approximation algorithms for finding highly connected subgraphs / S. Khuller. – Boston: PWS Publishing Co., 1996. – 364 p.
63. Bettstetter C. On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network / C. Bettstetter // Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2002) : ACM International Symposium, June 9-11 2002 : proceedings. – Lausanne, 2002. – P. 80–91.
64. Zhang H. On the critical total power for asymptotic k-connectivity in wireless networks / H. Zhang, J. C. Hou // IEEE INFOCOM'2005 : The 24th Annual Joint Conference, March 13-17 2005 : proceedings. – Miami, 2005. – P. 466–476.
65. Бахтин А. А. Разработка методов управления связностью и обеспечения качества обслуживания в мобильной эпизодической сети с ретрансляцией: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. Наук : спец. 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» / А. А. Батхин. – М., 2009. – 27 с.
66. Фокин Г. А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.13 «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети» / Г. А. Фокин. – СПб., 2009. – 19 с.
67. Reidt S. Connectivity Augmentation in Tactical Mobile Ad hoc Networks / S. Reidt, S. Wolthusen // IEEE MILCOM'08 : Military Communications

- Conference, November 17-19 2008 : proceedings. – San Diego, 2008. – Vol. 3. – P. 1441–1448.
68. Скулиш М. А. Телефонний трафік. Постановка оптимізаційної задачі для мережі з емуляцією сервісу АТМ за протоколом РВЕЗ. / М. А. Скулиш, Л. С. Глоба // Моделювання та інформаційні технології. – 2009. – вип. 54. – С. 230–236.
 69. Скулиш М. А. Удосконалення алгоритму керування інформаційними потоками у вузлах телекомунікаційних мереж // Вісник Харківського національного університету. – 2009. – №863. – С. 236–245.
 70. Скулиш М. А. Метод керування трафіком в мультисервісному комутаційному центрі / М. А. Скулиш, Л. С. Глоба // Telecommunication Sciences. – 2011. – vol. 1. – № 2. – P. 30–40.
 71. Миночкин А. И. Межуровневый метод управления нагрузкой в сетях на основе нечеткой логики / А. И. Миночкин, В. А. Романюк, О. Я. Сова // Современные информационные и электронные технологии : 8-я научно-практическая конференция, 21-25 мая 2007 г. : материалы конф. – Одесса, 2007. – С. 127.
 72. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
 73. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Пер. с англ. / Б. Склад. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
 74. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
 75. Conan J. The weight spectra of some short low rate convolutional codes / J. Conan // IEEE Transactions on communications. – 1984. – vol.32. – P. 1050–1053.
 76. Давыдов А. В. Улучшенная оценка вероятности пакетной ошибки сверточных кодов в релейском канале с независимыми замираниями / А. В. Давыдов, А. А. Ломаев // Бионика и статистическая радиофизика :

- научная конференции по радиофизике, 7 мая 2005 г. : труды конф. – Нижний Новгород, 2005. – С. 194–195.
77. Миночкин А. И. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17–24.
 78. Chen J.-K. Expected link life time analysis in manet under manhattan grid mobility model / J.-K. Chen, C. Chen, R.-H. Jan, H.-H. Li // Analysis and simulation of wireless and mobile systems : the 11th ACM international conference on modeling, October 27-31 2008 : proceedings. –Vancouver, 2008. – P. 162–168.
 79. Zhao M. A Unified Mobility Model for Analysis and Simulation of Mobile Wireless Networks / M. Zhao, W. Wang // Wireless Networks. – 2009. – vol.15. – P. 365–389.
 80. Xu S. An Analysis of Framework for Mobility Metrics in Mobile Ad Hoc Networks / S. Xu, K. L. Blackmore, H. M. Jones // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2007. – P. 16.
 81. Сборник задач по математике для втузов. В 4 частях. Ч.1: Учебное пособие для втузов / Под ред. А.В. Ефимова, А.С. Поспелова. – М.: Физматлит, 2001. – 288 с.
 82. Миночкин А. И. Управление топологией мобильной радиосети / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2003. – №2. – С. 28–33.
 83. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. / Пер. И. И. Грушко; ред. В. И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 432 с.
 84. Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics / L. Kleinrock, F. A. Tobagi // IEEE Transactions on communications. – 1975. – Vol. 23. – №12. – P. 1400–1416.

85. Ильченко М. Е. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов / М. Е. Ильченко, С. Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Наукова думка, 2003. – 266 с.
86. Байндер Р. Архитектуры межспутниковых каналов для многоспутниковой системы связи / Р. Байндер, С. Д. Хаффмен, И. Гуранц, П. А. Вина // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75. – С. 90–100.
87. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
88. Миночкин А. И. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2001. – №1. – С. 31–36.
89. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
90. Миночкин А. И. Управление топологией мобильной радиосети / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2003. – №2. – С. 28–33.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Заступник директора Інституту проблем
 математичних машин і систем НАНУ
 д.ф.м.н., професор В.П. Клименко
 « 20 12 2020 р.
 М.П.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень, які викладено
 у кандидатській дисертації Новікова Валерія Івановича
 на тему «Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних
 мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ»

Комісія у складі провідного наукового співробітника, д.т.н. Беха О.Д. та старшого наукового співробітника, к.т.н. Волобоса В.П., склали цей акт, в тому, що наукові і практичні результати кандидатської дисертації Новікова В.І. можуть бути використані у діяльності Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Комісія встановила наступне:

1. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ.

Суть удосконалення моделі, що визначає її новизну, полягає в тому, що запропоновано прийом сумісного використання сукупності аналітичних моделей оцінки достовірності передачі даних в радіоканалах із сукупністю аналітичних моделей прогнозування переміщення мобільних абонентів. Це дозволило не тільки оцінювати наявність зв'язності відповідно до заданої достовірності, а й прогнозувати її тривалість в умовах швидкого та передбачуваного переміщення мобільних абонентів. Розвинуті аналітичні моделі прогнозування переміщення мобільних абонентів дозволяють здійснювати імітаційне моделювання середнього часу перебування мобільних абонентів в зоні радіо покриття ТАП та визначати частоту зміни положення ТАП у просторі.

2. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ.

Суть удосконалення алгоритму, що визначає його новизну, полягає в тому, що в цьому алгоритмі вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення ТАП завдяки використанню попередньо розробленої сукупності правил відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищують її пропускну здатність, а також зменшують час обчислень. Це дозволяє отримати в режимі реального часу близькі до оптимальних рішення і використовувати алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Відхилення квазіоптимальних рішень від оптимальних, отриманих методом повного перебору, не перевищує 5-7%.

3. Результати роботи можуть бути використані для вирішення широкого спектру завдань, пов'язаних з моніторингом стану навколишнього середовища на значних географічних ландшафтах. Результати роботи мають важливе прикладне значення та можуть бути використані в розробках Інституту проблем математичних машин і систем НАН України. Оцінка обсягу впровадження становить 200-300 тис. грн. (Цей акт не є основою для виплати грошової винагороди).

Провідний науковий
 співробітник, д.т.н.


О.Д. Бех

Старший науковий
 співробітник, к.т.н.

В.П. Волобос

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТВО заступника начальника Військового
інституту телекомунікацій та інформатизації
імені Героїв Криму наукової роботи
к.т.н., доцент Г. Радівілов
«01»  2020 р.

АКТ

впровадження наукових результатів дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук Новікова Валерія Івановича на тему
«Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних
мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ»

Комісія у складі: голова комісії – начальник кафедри автоматизованих систем управління д.т.н., с.н.с. Сова О.; член комісії – професор кафедри автоматизованих систем управління д.т.н., професор Романюк В. розглянула результати дисертаційної роботи Новікова В.І. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук і встановила наступне.


Вперше розроблено метод підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами з управління положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Відмінність розробленого методу від відомих, що визначає його новизну, полягає в тому, що вперше запропоновано об'єднати в єдину обчислювальну процедуру математичні моделі оцінки структурно-функціональної зв'язності мобільних абонентів та удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ, що дозволяє досягати близьких до екстремальних значень пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних сенсорів.

Застосування методу дозволяє підвищити пропускну здатність мережі на 10 – 12 % у порівнянні із результатами застосування існуючих методів.

Отримані в дисертації результати є актуальними для вирішення завдань стосовно модернізації та розвитку системи зв'язку та автоматизації ЗС України в тактичній ланці управління військами і будуть використані у навчальному процесі під час підготовки офіцерських кадрів за спеціальністю „Інформаційні системи та технології”, а також в ході виконання НДР державного замовлення при формуванні оперативно-тактичних вимог до перспективних систем та засобів зв'язку та автоматизації.

Голова комісії – начальник кафедри автоматизованих систем управління
д.т.н., с.н.с.  О. Сова

Член комісії професор кафедри автоматизованих систем управління
д.т.н., професор  В. Романюк

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова Асоціації фахівців
 Цивільного захисту
 Д.т.н., с.н.с. Сергій ЧУМАЧЕНКО
 15 жовтня 2020 р.



АКТ

впровадження результатів наукових досліджень, які викладено
 у кандидатській дисертації Новікова Валерія Івановича
 на тему «Метод підвищення пропускну здатності мобільних безпроводових
 сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ»

Комісія у складі д.т.н. професора Яковлєва Є.О., к.т.н. доцента
 Пономаренко С.О. склали цей акт, в тому, що результати дисертаційної роботи
 Новікова В.І. мають наступну науково-практичну значимість:

- є актуальними для оперативного моніторингу заданого району з метою оцінювання ризику виникнення надзвичайної ситуації;
- можуть бути використані в діяльності пошуко-рятувальних загонів як технологічна основа інформаційно-телекомунікаційного забезпечення системи підтримки і прийняття рішення під час пошуково-рятувальних робіт в зоні природних та техногенних катастроф. Можливий економічний ефект складатиме до 500 тис. грн.;
- використані в діяльності асоціації для макетування процесів конфігурації сенсорних мереж із використанням сучасних протоколів;
- дозволяють збільшити пропускну здатність сенсорної радіомережі у середньому на 15-20%, знизити енерговитрати витрати вузлів, шлюзів, маршрутизаторів і контролерів мережі у середньому на 13-15%, підвищити оперативність планування та перепланування мережі на порядок, зменшити вартість створення безпроводової сенсорної мережі в зоні стихійного лиха, що проектується, у середньому до 10% в порівнянні з кращими раніш відомими технологіями.

Цей акт не є основою для виплати грошової винагороди.

Д.т.н. професор



Євген ЯКОВЛЄВ

К.т.н., доцент



Сергій ПОНОМАРЕНКО

ДОДАТОК Г

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІТС КПІ ім. Ігоря Сікорського

Михайло ІЛЬЧЕНКО

"22" листопада 2020 р.

Акт

впровадження у навчальний процес

результатів дисертаційних досліджень Новікова Валерія Івановича на тему
 «Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових
 сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних
 аероплатформ»

Комісія у складі: голови комісії - завідувача кафедри телекомунікаційних систем д.т.н., професора Уривського Л.О., та членів комісії: заступника завідувача кафедри телекомунікаційних систем к.т.н., доцента Максимова В.В., доцента кафедри телекомунікаційних систем к.т.н., доцента Мошинської А.В., доцента кафедри телекомунікаційних систем доцента Носкова В.І. встановила наступне.

1. Результати аналізу існуючих методів підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ впроваджено у навчальний процес з дисципліни «Математичні методи наукових досліджень в телекомунікаціях та радіотехніці» (РНП для підготовки докторів філософії, 2 рік навчання).

2. Математична модель оцінки зв'язності вузлів мобільних безпроводових сенсорних мереж із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ впроваджена у навчальний процес з дисциплін: «Математичні методи наукових досліджень в телекомунікаціях та радіотехніці» (РНП для підготовки докторів філософії, 2 рік навчання).

3. Аналітичні моделі оцінки показників функціонування мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ впроваджені у навчальний процес з дисциплін: «Теорія ймовірностей та математична статистика» (РНП для підготовки бакалаврів, 2 рік навчання), «Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці» (РНП для підготовки докторів філософії, 2 рік навчання).

4. Метод підвищення пропускної здатності мобільних безпроводових сенсорних мереж на основі використання телекомунікаційних аероплатформ з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ впроваджено у навчальний процес з дисциплін: «Прикладні аспекти системного аналізу в телекомунікаціях та радіотехніці» (РНП для підготовки докторів філософії, 2 рік навчання).

Голова комісії
 Члени комісії:

Леонід УРИВСЬКИЙ

Володимир МАКСИМОВ

Аліна МОШИНСЬКА

В'ячеслав НОСКОВ